

SEMICONDUCTORES DE DIAMANTES

EL HOMBRE PRIMITIVO, ¿CAZADOR O CARROÑERO?

TENDENCIAS EUROPEAS EN EDUCACION

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

CRIPTOGRAFIA CUANTICA

DICIEMBRE 1992
600 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



Diciembre de 1992 Número 195



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Joandomènec Ros: *Número de especies que habitan la Tierra* y *Orugas canoras, hormigas y simbiosis*; Luis Bou: *Criptografía cuántica, Juegos matemáticos* y *Juegos de ordenador*; Marta Estrada: *El mal de altura*; Esteban Santiago: *Las histonas, proteínas reguladoras de genes*; Amando García: *Semiconductores de película de diamante;* José M. García de la Mora: *Carroñeo y evolución humana*; J. Vilardell: *Hace...*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca.*

Ciencia y sociedad:

Francesc Pedró, J. M. V. Martínez, Plinio Montoya y Josep E. Llebot

Ciencia y empresa:

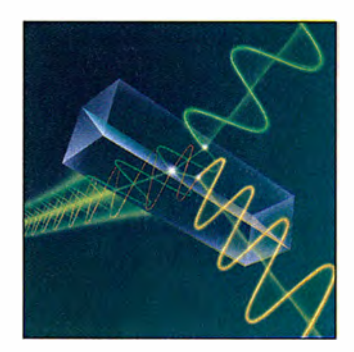
Manuel Puigcerver

Libros:

Juan José Acero, Josep Pla i Carrera y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	*The Terrestrial Paradise*, de Jan Brueghel the Elder, Museo Lázaro Galdiano/Art Resource
8-9	Jana Brenning (*abajo*)
10	Johnny Johnson (*gráfica*), Jana Brenning (*dibujo*)
11	Guilbert Gates/JSD
12	Kathleen Katims/JSD
15	Robert Prochnow
16	Cortesía de David Kahn, © 1983 Macmillan Publishing Company
17-21	Michael Goodman
25	Galen Rowell/Mountain Light Photography
26-27	Patricia J. Wynne
28	Carol Donner
29	Patricia J. Wynne
45	Timothy J. Richmond, Biblioteca del Instituto Federal de Tecnología de Suiza, Zurich
46	Ian Worpole; Barbara A. Hamkalo, Univ. de California, Irvine (*recuadro*)
48-49	Ian Worpole
50	Stephen J. Kron y Gerald R. Fink, Whitehead Institute (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*)
51	Ian Worpole
55-57	Philip J. DeVries
58	Philip J. DeVries (*izquierda*), Jason Goltz (*derecha*)
59	Patricia J. Wynne
60	Johnny Johnson (*diagrama*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
63	Jared Schneidman
64	Robert Clausing, Laboratorio Nacional Oak Ridge
65	Jared Schneidman
66	Guilbert Gates/JSD (*arriba*), Jared Schneidman (*abajo*)
67	Guilbert Gates/JSD
70-71	Patricia J. Wynne
72	Robert J. Blumenschine
73	Leonard Lee Rue/Bruce Coleman, Inc. (*fotografía*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
74	Patricia J. Wynne
75	Johnny Johnson (*gráfico*), Patricia J. Wynne (*dibujos*)
76	John A. Cavallo
78-79	Godo-Foto
80-81	Francesc Pedró
82-83	Francesc Pedró y Antonio Aragón
84	Godo-Foto
86	Francesc Pedró
93-96	Documentos Pour La Science
98-100	Jana Brenning



LA ILUSTRACION DE LA PORTADA muestra un prisma Wollaston de calcita, componente crucial de un sistema criptográfico capaz de trasladar información en absoluto secreto. El prisma desvía hacia la izquierda los fotones polarizados en dirección horizontal, dirigiendo en cambio hacia la derecha los dotados de polarización vertical. Dos personas podrían enviarse información generando y midiendo después fotones de distinta polarización y detectar, además, si su comunicación ha sido espiada (véase "Criptografía cuántica", por Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur K. Ekert, en este mismo número). Dibujo de la portada: Tomo Narashima.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6.º 1.ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6.º 1.ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6.º 1.ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Buenos Aires, 52, 1.º 3.ª
08036 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

... cincuenta años

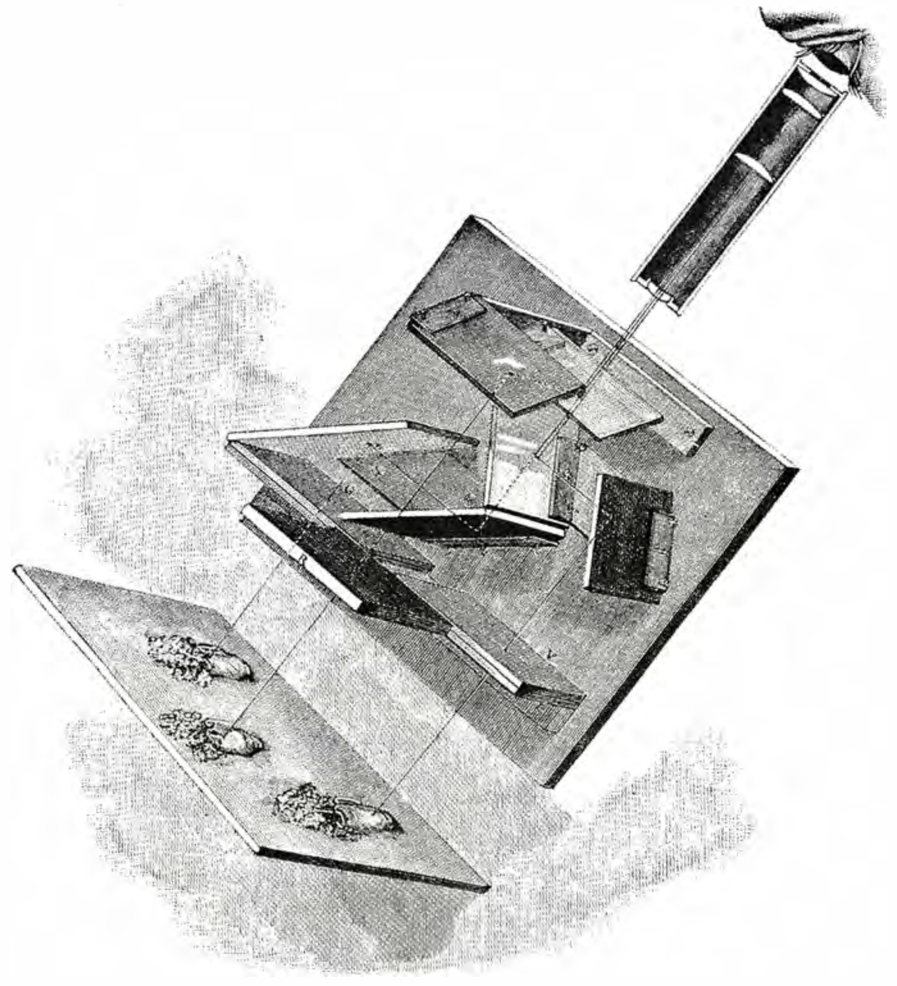
SCIENTIFIC AMERICAN: «Hasta ahora desconocemos por completo el cómo y el por qué tal cantidad de materia galáctica pudo nunca disgregarse en masas tan enormes como las estrellas. Es realmente difícil entender de qué modo pudo suceder tal cosa, si partimos de la hipótesis clásica de que la materia estaba "originalmente" distribuida más o menos uniformemente por todo el espacio galáctico. En este supuesto, la materia que finalmente conformó cada estrella habría estado distribuida ocupando un volumen de al menos un año luz de diámetro. Salvo que los movimientos relativos en el seno de esta acumulación dispersa fueran pequeñísimos, la masa, al contraerse hasta el tamaño de una estrella, estaría girando a una velocidad mucho mayor que la media de las estrellas.»

«El hallazgo, en 1927, en Folson (Nuevo México), de utensilios que delatan la factura humana, junto con huesos de una especie de bisonte probablemente extinguido desde la fase final del Período Glacial, se ha repetido desde entonces en otras regiones merced a la actuación de investigadores que trabajaron bajo condiciones de control estricto. Pero persiste la controversia acerca de la edad exacta de la cultura de Folson y, en buena parte, en torno a la cuestión de cuándo desaparecieron realmente aquellos grandes animales del Período Glacial. La mayoría de los geólogos y estudiosos de fósiles de animales que han tratado de colaborar en la datación de estos restos tienen la impresión de que el último de aquellos animales pereció en la fase final del último retroceso glacial hace entre 15.000 y 25.000 años. No obstante, algunos expresan la creencia de que muchas de esas reses arcaicas acaso subsistieron hasta el 5000 a. C.»

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «"La sinceridad de intención y la honradez intelectual que se cultivan en los laboratorios de física y química contrastan violentamente con las peligrosas tendencias al posibilismo, sofistería, casuística y autoengaño que tan insidiosamente acechan a la profesión de la dialéctica y retórica según es tradición en las escuelas. Gran parte del aprendizaje que en mi niñez recibí en el colegio estaba orientado, y no exagero, directamente al arte de aparentar lo mejor con lo peor. Incluso allá donde no había elementos de autorridiculización presumida y jactanciosa, se amagaba una exaltación peligrosa y nociva de la forma sobre el fondo en los trabajos estudiantiles, la cual premiaba lo brillante a costa de lo profundo. Ningún estudiante de física o química podría defender una tesis en la que él mismo no crea. En tal artera habilidad carece de práctica. El único éxito que espera es estar en lo cierto y lo único que teme es estar equivocado. La brillantez en el error sólo agranda el fracaso, haciéndolo más patente y grotesco." *—Francis A. Walter, presidente del Instituto de Tecnología de Massachusetts.*»

«Aunque la fotografía en color no sea todavía un hecho consumado y aunque ninguna de las experiencias aliente la esperanza de que se consiga pronto, merced a una invención de F. E. Ives pueden conseguirse cuadros fotográficos mediante fotografías tomadas en placas ortocromáticas a través de pantallas de color selectivas. A partir del triple negativo así obtenido se saca por contacto una trasparencia en positivo, teniendo cada imagen y sus distintas porciones los valores cromáticos verdaderos. Según la teoría moderna acerca de la visión en color, el rojo, el verde y el violeta se consideran colores primarios; por tanto, las tres imágenes representan esos tres colores y, cuando se observan a través de un instrumento provisto de pantallas de color rojo, verde y violeta y dotado de medios para fundir las tres imágenes en una, se muestran todos los colores del objeto.»



Formación de imágenes en color en el heliocromascopio.

Número de especies que habitan la Tierra

Aunque nadie sabe cuántas, el conocer la cifra importa para el éxito de los esfuerzos en pro de la conservación de la diversidad biológica, la resolución de cuestiones cruciales acerca de la evolución y la eficacia de la gestión del ambiente

Robert M. May

Si un explorador extraterrestre aterrizara entre nosotros, ¿cuál es la primera pregunta que formularía? El forastero inquiriría, así lo pienso, sobre el número y diversidad de los organismos de este planeta. Puesto que los atributos físicos de la Tierra derivan de leyes universales y esencialmente determinísticas, el visitante, un viajero empedernido a buen seguro, habría visto probablemente innumerables mundos similares por todo el universo. Pero la urdimbre de fuerzas evolutivas y la textura de azar que hiló el rico tapiz de la vida en la Tierra son, casi con absoluta certeza, únicas.

Para nuestro sonrojo, no podríamos contestar, ni siquiera de manera aproximada, a la pregunta del extraterrestre. A pesar de más de 250 años de investigación sistemática, las estimas del número total de especies de plantas, animales y otros organismos varían mucho, de tres millones a 30 millones o más. Puesto que no existen archivos centrales, nadie sabe tan siquiera cuántas especies han recibido ya su denominación propia y han quedado registradas.

Me preocupa la gravedad de esa situación, exacerbada por la celeridad con que se están destruyendo los hábitats naturales. El conocimiento del número total y de la distribución de las especies es fundamental para desarrollar un programa racional que conserve la máxima diversidad biológica. El gobierno británico expresó esa idea con admirable claridad en un libro blanco de 1990: "El punto de partida para este Gobierno es el imperativo ético de administración que debe impregnar todas las políticas ambientales... Tenemos el deber moral de cuidar de nuestro planeta y de transmitirlo en buen orden a las generaciones futuras."

ROBERT M. MAY es, desde 1989, profesor de investigación de la Real Sociedad en la Universidad de Oxford y en el Colegio Imperial de Londres. Físico teórico de formación, se pasó al campo de la biología en los años setenta, interesándose por la dinámica de las poblaciones animales y por las relaciones entre la estabilidad y la complejidad en las comunidades naturales. Su atención está absorbida ahora por los factores que influyen sobre la diversidad y la abundancia de las especies, en particular las interacciones evolutivas entre los parásitos y sus patrones.

Los gobernantes tienen sobre su mesa un amplio repertorio de problemas ambientales que exigen conocer mejor el modo en que cambian los ecosistemas cuando las especies que los constituyen se extinguen y son sustituidas por otras formas de vida. Una tal investigación explora la relación fundamental entre la diversidad y la estabilidad de una comunidad biológica. También tiene que ver con otros temas apremiantes, como la predicción de las alteraciones en el clima de la Tierra. Después de todo, la atmósfera terrestre, rica en oxígeno, debió su origen a los seres vivos, un hecho que subraya hasta qué punto los ecosistemas y la atmósfera están entrelazados.

De forma más inmediata, las razones prácticas para contar y catalogar las especies son también de peso. Una fracción considerable de las medicinas modernas se ha desarrollado a partir de compuestos biológicos que se encuentran en las plantas. La sociedad haría bien en seguir observando otros estantes de la alacena en vez de destruirlos. Muchos frutos y tubérculos nutritivos siguen estando en gran parte sin explotar; su cultivo



1. ***EL PARAISO TERRENAL*****, de Jan Brueghel el Viejo. El cuadro recoge las especies más útiles o atractivas para el hombre; de ahí la representación desmesurada de aves y mamíferos. Estos prejuicios históricos llegan hasta los inventarios modernos de las especies de aves y mamíferos, muy completos, en tanto que existe amplísimo desconocimiento sobre la diversidad específica de insectos, arañas, hongos, nemátodos y bacterias, entre otros.**

ampliaría y mejoraría la oferta global de alimentos.

Dentro mismo de los géneros familiares de plantas cultivadas, se continúan descubriendo nuevas variedades locales. Estas variantes constituyen la materia prima a partir de la cual se pueden crear estirpes más rentables y resistentes a las enfermedades, por hibridación selectiva o mediante ingeniería genética. El éxito de la agricultura intensiva moderna ha venido acompañado de una arriesgada merma en la diversidad de las plantas que usan los agricultores, lo que aumenta la sensibilidad de las cosechas a la enfermedad y a los cambios de clima. La gran probabilidad de transformaciones globales en el ambiente refuerza la conveniencia de conservar el acervo génico y de explorar las posibilidades de otros vegetales.

El esfuerzo por abordar el mundo orgánico como un sistema ordenado se remonta, por lo menos, a Aristóteles. El sueco Carolus Linnaeus (Linneo) inició la taxonomía, práctica que consiste en dar nombre y registro sistemático a las especies. La décima edición, canónica, de su libro *Systema Naturae*, donde aparecen registradas 9000 especies de plantas y animales, se publicó en 1758, un siglo después de que Isaac Newton hubiera llegado a una comprensión analítica y predictiva de las leyes de la gravedad, basada en siglos de observaciones astronómicas detalladas.

De entonces acá, los taxónomos han venido añadiendo especies a la lista de Linneo a un ritmo muy dispar según la categoría taxonómica de que hablemos. El centro de atención se ha polarizado, con mucho, en los animales dotados del encanto del plumaje o del pelaje. Casi se ha dado remate al catálogo de tales especies. En efecto, no había transcurrido un siglo desde el trabajo del profesor de Uppsala y ya estaban registradas la mitad de las 9000 especies conocidas de aves. El ritmo anual de identificación actual de nuevas especies de aves es de tres a cinco de ellas. Se asiste a una situación similar con los mamíferos, con una tasa media anual de descubrimientos cifrada en una veintena de especies y un género nuevos. De aproximadamente la mitad de éstas se ignoraba su existencia (en su mayoría roedores, murciélagos y musarañas), mientras que el resto procede de la reclasificación, instada por el avance de la bioquímica, de especies ya conocidas.

Pero si aludimos a otros organismos, advertiremos una pauta muy distinta. Un registro del número creciente de especies conocidas de arácnidos y crustáceos (artrópodos también, como los insectos) muestra que, durante la época de la Restauración, predominaron tasas de descubrimiento bastante altas; le sucedió una época de calma prolongada. Más de la mitad del total actual de estas especies se ha añadido en sólo las últimas décadas. En un estudio reciente, Peter M. Hammond, del Museo de Historia Natural de Londres, demostró que, de 1978 a 1987, el número de especies conocidas de aves aumentó por término medio sólo un 0,05 por ciento anual. A lo largo del mismo período, el número registrado de especies de insectos, arácnidos, hongos y nemátodos se expandió, respectivamente, en un 0,8, 1,8, 2,4 y 2,4 por ciento anuales.

Estas tasas de descubrimiento dispares reflejan, en cierta medida, la



diferencia de efectivos dedicados a estudiar cada grupo de organismos. Las estadísticas precisas de dicha fuerza laboral son difíciles de obtener. No obstante, cierto estudio superficial de los taxónomos de Australia, Estados Unidos y Gran Bretaña realizado por Kevin J. Gaston, del Museo de Historia Natural, y por mí, ofrece alguna indicación de tendencia. Si suponemos que N representa el número medio de taxónomos que estudian cada especie de tetrápodo (todos los vertebrados excepto los peces), hay entonces aproximadamente 0,3N taxónomos por cada especie de peces y sólo de 0,02N a 0,04N por cada especie de invertebrado. En Norteamérica trabajan unos 10.000 taxónomos; el total global podría triplicar esa cifra.

En conjunto, el número de taxónomos por especie vegetal dobla el de taxónomos por especie animal. Dentro del reino animal, la atención que recibe una especie de vertebrado promedio decuplica la atención taxonómica que merece la planta promedio, mientras que el invertebrado promedio recibe aproximadamente un orden de magnitud menos atención (es decir, diez veces menos). La distribución de los taxónomos no se ajusta, a ojos vista, con la riqueza específica de los distintos taxones. Además, en Iberoamérica y Africa subsahariana, donde reside gran parte de la diversidad biológica de la Tierra, trabajan solamente alrededor del 4 % de los taxónomos.

La inexistencia de un banco central de información sobre las especies supone un obstáculo más crítico para la compilación de un inventario completo. Los registros poseen sus fichas anticuadas y apenas si existe relación entre instituciones, muy dispersas además. Carecemos de un recuento oficial de las especies etiquetadas. Se domina mucho mejor la sistemática de las estrellas (y se invierte muchísimo más dinero en su estudio) que la sistemática de los organismos de nuestro planeta. En consecuencia, se posee parejo conocimiento del número de átomos que componen el universo (una abstracción inimaginable) que del número de especies que integran el reino vegetal y el animal.

Según los cálculos más fiables, se han identificado de 1,5 a 1,8 millones de especies. Un inventario que, por supuesto, no es exhaustivo. Para hacerse una idea, siquiera aproximada, de la cifra real de organismos diversos se han seguido varios métodos, unos empíricos, teóricos otros; la estimación más baja sugiere la existencia de tres millones de especies, tantas que resultan insuficientes las técnicas disponibles para descubrirlas y catalogarlas todas dentro de un tiempo razonable.

Varios han inferido el total global por extrapolación de las tendencias observadas en el decurso de la identificación de nuevas especies; se trata de una opción que se presta a interpretaciones divergentes según hayan sido las técnicas estadísticas empleadas. Cierto estudio reciente, que se apoyaba en proyecciones estadísticas distintas en razón de las tendencias de descubrimiento de cada grupo importante, llegó a la conclusión de que había de seis a siete millones de especies. Para otros, fundados en las opiniones de expertos de cada grupo, existirían más de cinco millones de especies.

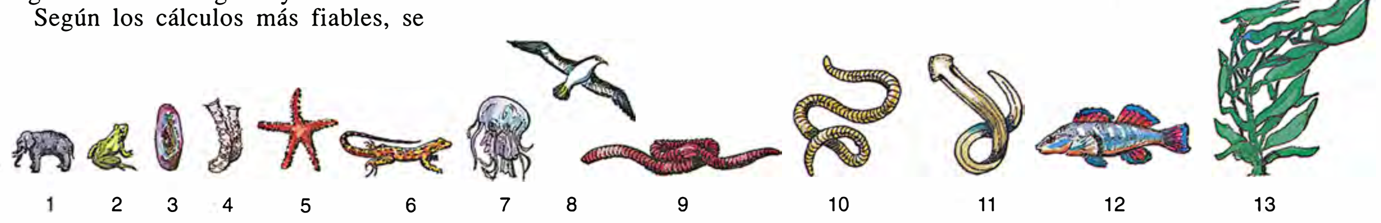
Muchas proyecciones se atienen a un argumento intuitivo sencillo, basado en la concentración relativa de las especies en las diferentes categorías taxonómicas. Para los grupos bien estudiados, así aves y mamíferos, las especies tropicales vienen a doblar el número de las que habitan en regiones templadas o boreales. En lo concerniente a los insectos, que reúnen la mayoría de todas las especies registradas, se conocen mucho mejor las faunas septentrionales que las tropicales; unos dos tercios de todas las especies identificadas de insectos viven fuera de los trópicos. Si la proporción entre número de especies tropicales y de especies templadas y boreales fuera la misma para los insectos que para los mamíferos o las aves (hipótesis sin suficiente respaldo), debería haber dos especies de insectos tropicales sin identificar por cada especie templada o boreal que contara ya con su denominación linneana. En línea con ese razonamiento, los 1,5 o 1,8 millones de especies registradas aumentan a tres o cinco millones.

Podemos calcular por un camino más directo el total de especies (en particular el número de las relativas a insectos tropicales) mediante un muestreo exhaustivo de los organismos que viven en determinada región apenas herborizada y rastreada, para establecer luego qué fracción de las plantas y animales se había descrito con anterioridad. La tarea no es menor, si tenemos en cuenta la dificultad que entraña muestrear todos los insectos tropicales por limitada que sea la superficie acotada, para pasar luego a un trabajo más duro, el de identificarlos y clasificarlos. Sin olvidar aclarar el carácter representativo, o no, de los modelos generales de distribución de especies que ofrece el lugar o el grupo.

Ian D. Hodkinson y David S. Casson, del Instituto Politécnico de Liverpool, se centraron en los hemípteros (o chinches verdaderas) de una región de extensión moderada y topografía heterogénea de la pluviselva tropical de Sulawesi, en Indonesia. Recolectaron 1690 especies de chinches terrestres, de cuyo 63 por ciento no se tenía noticia hasta entonces. Si esta fracción es representativa de los insectos en general, podemos inferir, de las 900.000 especies registradas, la existencia real de dos a tres millones de especies.

Hammond empleó una versión diferente de esta técnica de población local. Observó que las 22.000 especies de insectos encontradas entre la fauna, bien inventariada, de Gran Bretaña incluyen 67 especies de mariposas. Muchos naturalistas conceden a las mariposas la condición honoraria de las aves, y de aquí que las 17.500 especies conocidas representen un registro casi completo. El número real seguramente no sobrepasa las 20.000.

Si la composición taxonómica de la fauna de insectos de Gran Bretaña se parece a la composición global, en el mundo habría unos seis millones (22.000 multiplicado por 20.000 y dividido por 67) de especies de in-



3. RIQUEZA DE LA DIVERSIDAD BIOLOGICA de la Tierra. El panorama al que estamos acostumbrados cambia cuando ordenamos los organismos según su respectiva aportación a la biodiversidad total, medida por el número de especies en los

sectos. Pero esos cálculos de aumento creciente adolecen de una indeterminación intrínseca: nadie puede asegurar que un tal grupo de insectos o un cual lugar constituyan el arquetipo de la población general de insectos.

Terry L. Erwin, de la Institución Smithsoniana, dirigió un estudio muy sugestivo, que implicó el examen de las faunas de coleópteros de la bóveda de árboles tropicales. Los coleópteros se distinguen de los demás insectos por los élitros, placas duras que, a modo de alas, cubren las alas interiores funcionales. Aproximadamente una de cada cinco de todas las especies registradas son coleópteros; ante ese fenómeno, J. B. S. Haldane, genético inglés, comentaría con humor que sus estudios del mundo natural le habían enseñado la afición inmoderada por los escarabajos que posee el Creador. Además, las selvas tropicales son lugares muy ricos en biodiversidad. Aunque sólo abarcan una dieciseisava parte de la superficie emergida de la Tierra, las selvas tropicales pueden albergar al menos tantas especies como todas las restantes regiones del mundo conjuntamente. Ello no obstante, muy pocos previeron el alcance del trabajo de Erwin.

Este se sirvió de una niebla insecticida para recolectar, en Panamá, coleópteros de la bóveda de árboles de la especie *Luehea seemannii*, primos tropicales del tilo. A lo largo de tres estaciones, Erwin encontró hasta unas 1200 especies de escarabajos. Todavía no las ha identificado y no sabe, pues, cuántas falta por inventariar, ni puede aplicar el método de extrapolación descrito más arriba. De ahí que haya optado por la siguiente línea de razonamiento.

Necesitaba empezar por averiguar cuántas de las especies de coleópteros que recolectó viven ligadas a *L. seemannii*, frente a las que se hallan distribuidas en muchos tipos de árboles. Conjeturó que alrededor del 20 por ciento de las especies de coleópteros herbívoros (el grupo más numeroso de su muestra) se hallan ligadas a determinada especie de árbol tropical. Sobre esta base, estimó que un tipo de árbol contiene una media de 160 especies de coleópteros de la bóveda arbórea. En segundo lugar, Erwin dedujo el total de especies de insectos a partir de la densidad de especies de los coleópteros de la bóveda. El cuarenta por ciento de todos los insectos conocidos son coleópteros; si esta proporción rige en las bóvedas de árboles tropicales, entonces cada especie arbórea da cobijo específico a 400 tipos de insectos de la bóveda.

Prosiguió, en un tercer paso, admitiendo que la bóveda arbórea contiene dos tercios de las especies de insectos que viven en el árbol, lo que implica un total de 600 especies de insectos en cada variedad de árbol tropical. Apeló, por último, a la estima aceptada de unos trópicos con unas 50.000 especies de árboles. Multiplicando 600 especies de insectos por 50.000 especies de árboles se obtienen 30 millones de especies de insectos. Esa cifra sería mucho mayor si nos refiriésemos a las especies de todo el mundo.

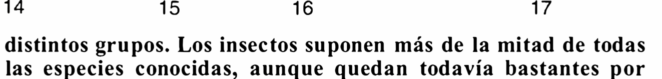
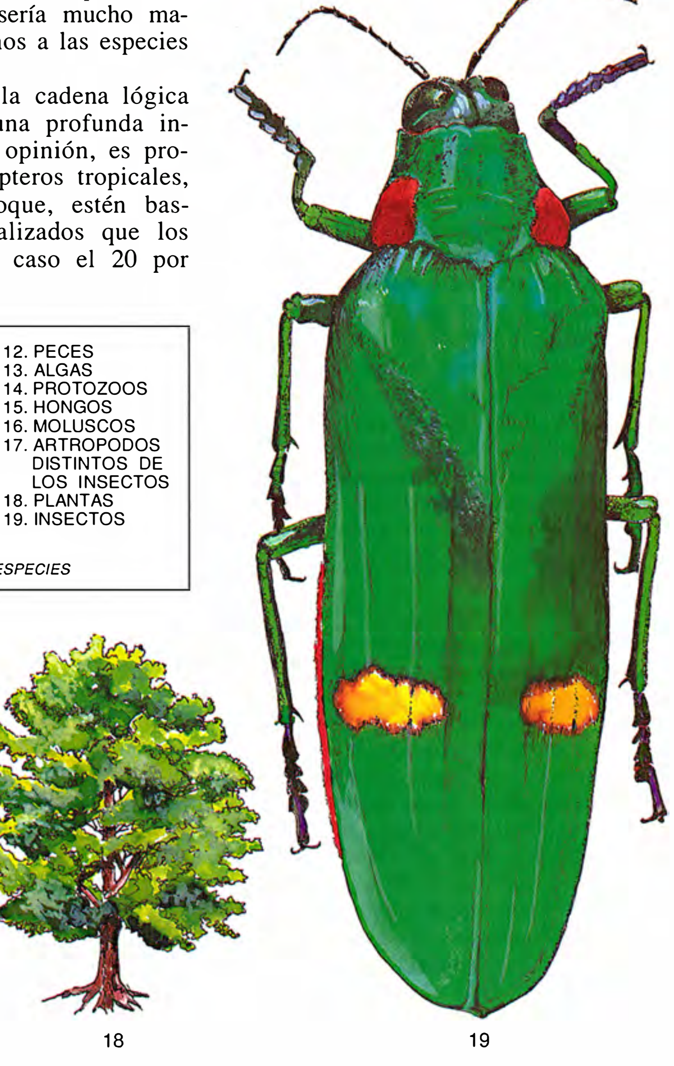
Cada eslabón en la cadena lógica de Erwin entraña una profunda incertidumbre. En mi opinión, es probable que los coleópteros tropicales, considerados en bloque, estén bastante menos especializados que los templados, en cuyo caso el 20 por ciento de Erwin se acercaría más al dos o tres por ciento. Por otra parte, Erwin verosímilmente subestimó la densidad de especies en la parte del árbol que no es la bóveda, que, tengo para mí, podría alojar hasta dos tercios de las especies de insectos.

Si se incorporan lo que yo considero números más realistas, los cálculos nos llevan a admitir sólo entre tres y seis millones de especies de insectos. No obstante, concedo su importancia al trabajo realizado por Erwin, ya que proporciona un enfoque ajustado del problema sobre el número de especies existente y resalta, asimismo, la interrelación de la taxonomía con la ecología. Más que haber logrado zanjar la cuestión de cuántas especies hay, hemos de reconocerle el mérito de haber definido un plan de investigación futura.

En última instancia, el registro de la diversidad biológica se propone amasar un fundamento sólido en que

1. MAMIFEROS
2. ANFIBIOS
3. BACTERIAS
4. ESPONJAS
5. EQUINODERMOS
6. REPTILES
7. CELENTEREOS
8. AVES
9. ANELIDOS
10. NEMATODOS
11. PLATELMINTOS
12. PECES
13. ALGAS
14. PROTOZOOS
15. HONGOS
16. MOLUSCOS
17. ARTROPODOS DISTINTOS DE LOS INSECTOS
18. PLANTAS
19. INSECTOS

ESCALA: 0,8 CM² = 1000 ESPECIES

distintos grupos. Los insectos suponen más de la mitad de todas las especies conocidas, aunque quedan todavía bastantes por identificar. Existen unas 4000 especies de mamíferos, la cuarta parte del 1 % del millón y medio de especies inventariadas.

apoyarse para dar respuesta a los interrogantes cruciales que penden sobre la evolución y la ecología. Los inventarios taxonómicos sirven de punto de partida para estudiar la estructura de las cadenas tróficas, la densidad relativa de especies, el número de éstas o la cifra total de organismos de distintas tallas, amén de las tendencias generales en el número y la distribución de los seres vivos. Algunos de tales estudios sugieren reglas generales para abordar el número de especies desde enfoques autónomos.

Una de esas técnicas aludidas parte de la observación de cierta pauta, la que se produce, en el dominio de los animales terrestres, entre número de especies y pertenencia a una respectiva categoría de tamaño corporal. En general, los taxónomos hallan que, por cada reducción de diez veces la longitud, se centuplica el número de especies que entran en ese rango de tamaño. La pauta funciona para animales cuya longitud va desde unos pocos metros hasta alrededor de un centímetro.

Por debajo de un centímetro, la relación empieza a desmoronarse. Débese ello, posiblemente, al carácter incompleto del inventario de los animales terrestres minúsculos. Si la pauta del tamaño y su relación con la densidad de especies se extendiera caprichosamente hasta los animales de un milímetro de largo (una línea divisoria arbitraria entre la vida macroscópica y la microscópica), llegaríamos a la conclusión de que habría unos 10 millones de especies de animales terrestres. Semejante inferencia por mera aproximación fenomenológica resultaría más convincente si los taxónomos dominaran mejor los factores fisiológicos, ecológicos y evolutivos responsables de la distribución del tamaño corporal.

(La regla de la distribución del tamaño aclara el problema de Noé con la manga, la eslora y el puntal del arca. Los quisquillosos de siempre hablan de los quebraderos de cabeza del patriarca, de solución imposible, si hubiera subido a bordo las miríadas de especies de insectos. Pero si una reducción de diez veces el tamaño, equivalente a achicar mil el volumen, resulta en sólo 100 veces más especies, cae por su peso que el problema residió en embarcar a los animales mayores.)

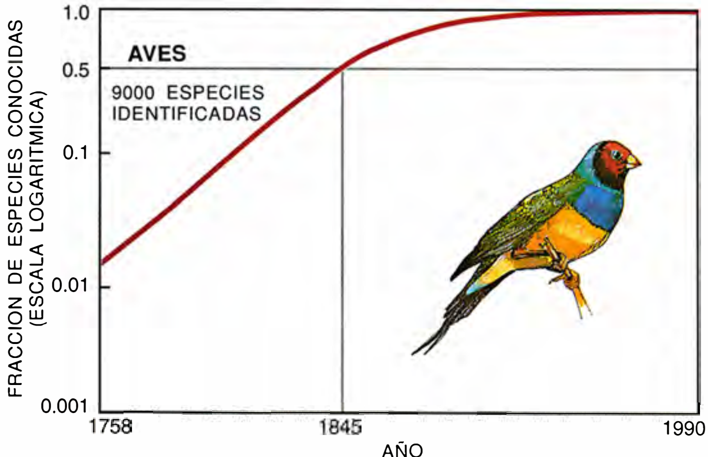
Las pautas generales en la estructura de la cadena trófica aportan la base para otro tipo de recuento de especies. Las plantas fotosintéticas crean la materia prima que forma el primer eslabón de la cadena trófica. Si pudiéramos obtener estadísticas precisas de las formas de vida distintas a las que puede prestar sustento una planta, nos sería dado entonces colegir el número total de especies a partir de los recuentos, bastante completos, de las especies vegetales.

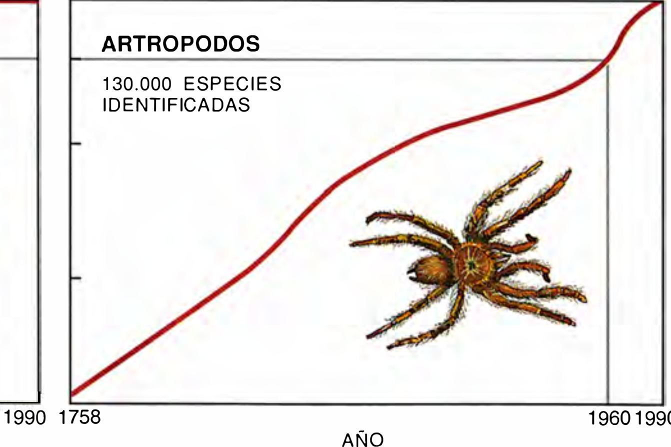
Si bien la ciencia anda muy lejos de esa meta, Gaston ha ampliado su inquisición anterior de las cadenas tróficas aprovechando datos disponibles sobre el número medio de especies de insectos que están asociados a cada especie vegetal, en comunidades de tamaños y lugares muy dispares. Halla, por término medio, una decena de especies de insectos por cada especie de planta. Considerando que se cifra, con bastante seguridad, en unas 270.000 especies el elenco absoluto de plantas vasculares, Gaston infiere una cuantía aproximada de tres millones de especies de insectos.

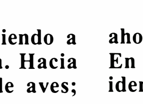
Hasta aquí el análisis se ha ceñido, de forma casi exclusiva, al cálculo del número de insectos terrestres. Tiene su explicación: estos animales constituyen ya más de la mitad de todas las especies clasificadas, y aun así distamos mucho de poseer un catálogo completo. Pero hay otros grupos que, en punto a diversidad, no les van a la zaga; de manera particular, los organismos pequeños, poco atractivos o ambas cosas a la vez han padecido a buen seguro un abandono injustificado.

David L. Hawksworth ha propuesto una revisión al alza del número total de especies fúngicas, tan sorprendente al menos como la sugerida por Erwin a propósito de los insectos. Los taxónomos, recuerda Hawksworth, han registrado unas 69.000 especies de hongos. En Gran Bretaña y otras regiones del norte de Europa que han sufrido rastreos exhaustivos, las especies fúngicas sobrepasan a las vasculares en una proporción aproximada de seis a una. Si esta proporción se cumple en todo el globo, quiere decir que las 270.000 especies de plantas vasculares catalogadas coexisten con 1,6 millones de especies de hongos, veinte veces más de las que conocemos.

Las pautas biológicas que observamos en las zonas templadas podrían no ser aplicables a las comunidades tropicales, desde luego. Las especies fúngicas tropicales pudieran asociarse, cada una, con una gama más amplia de plantas de la habitual en los hongos de zonas templadas; semejante disparidad de comportamiento rebajaría la relación de especies fúngicas a vegetales. Y, a la inversa, Hawksworth ignora los hongos asociados con los insectos aunque no con las plantas, lo que le fuerza a pecar por defecto en sus estimas. En







4. NUMERO DE ESPECIES registrado. Ha ido creciendo a un ritmo muy dispar en función de las formas de vida. Hacia 1845 se había descubierto la mitad de las especies de aves; ahora, muy pocas se van sumando cada año a la lista (*izquierda*). En el caso de arácnidos y crustáceos, la mayoría de las especies identificadas lo han sido desde los años sesenta (*derecha*).

estudios recientes de ciertas localidades tropicales, la proporción de especies de hongos no descritas hasta entonces ronda entre el 15 y el 30 por ciento, lo que está muy por debajo del 95 por ciento que cabría esperar si el cálculo de Hawksworth fuera correcto. Además, los trabajos no proceden con una visión sinóptica, por cuya razón sería injusto esperar que descubrieran la gama entera de especies sin catalogar.

El conocimiento parcial del número de especies de hongos no hace justicia a estos elementos vitales de la mayoría de los ecosistemas, pues colaboran en la descomposición del material orgánico y en la formación de suelo nuevo. Los hongos han modelado el desarrollo de la diversidad biológica; primero, por ayudar a las plantas a colonizar tierra emergida, y, después, mediante las relaciones simbióticas sobre todo, al colaborar en la dispersión y diversificación de las plantas vasculares, los insectos y otros organismos. Fracción tan notable de la biota terrestre merece más atención.

Los nemátodos son probablemente los peor inventariados de cuantos animales distinguimos a simple vista. Estos gusanos diminutos, parásitos de plantas y animales, viven libres en ambientes dulceacuícolas y marinos. Hacia 1860 sólo se habían reconocido 80 especies; el montante actual se eleva a 15.000. Pero la investigación reciente en tierra y en las aguas dulces induce a pensar que las especies clasificadas suponen sólo una minúscula fracción de la población total; y hay estudios que conceden una diversidad incluso mayor en el medio marino. Pocos taxónomos criticarían a Hammond cuando afirma que las especies de nemátodos no bajan de los centenares de miles.

Los seres vivos más pequeños (los invisibles al ojo desnudo) cumplen verosímilmente su papel en el mantenimiento de la diversidad. Protozoos, bacterias y virus integran sólo el 5 por ciento de las especies vivas clasificadas. La investigación acaba de revelar que la diversidad observada en las poblaciones naturales de microorganismos es mucho mayor de la conocida por los habituales cultivos de laboratorio. Cierto estudio del ARN de una alfombra de bacterias fotosintéticas en una fuente termal del Parque Nacional de Yellowstone evidenció la existencia de ocho tipos distintos de secuencias genéticas, ninguna de las cuales correspondía a las 12 cepas de bacterias cultivadas en el laboratorio y reputadas como características de dichas alfombras. Sólo una de las ocho secuencias presenta algún parecido estrecho con las que pertenecen a un tipo bacteriano reconocido.

Quienes han examinado secuencias de ARN ribosómico en las poblaciones microbianas marinas naturales han llegado a unos resultados bastante parecidos. Y ese tipo de trabajos, además, es de destacar por encima incluso de las revelaciones acerca de las faunas de las bóvedas arbóreas tropicales: demuestran, en efecto, cuantísimo se ignora sobre las formas de vida más simples y comunes.

No es tarea fácil delimitar las lindes específicas de bacterias y virus; cepas distintas intercambian fácilmente material genético y basta un solo progenitor para crear, por clonación, una población entera. Hay virus que mutan de forma manifiesta de un año para otro. Por ello los criterios fundamentales para definir una especie son más vagos en el caso de los microbios que en el de los vertebrados. Manfred Eigen y Peter Schuster defienden que la unidad básica de clasificación de muchos virus debería ser la cuasiespecie, un conjunto bien definido de secuencias

Vía indirecta para calcular la diversidad



(El método se refiere al caso de los insectos.) El número de especies de coleópteros que se encuentran en las bóvedas de una determinada especie arbórea constituye la base de la estima. El número de especies de coleópteros especializadas en ese árbol abarca todas las que viven sólo en él, la mitad de las que viven en dos tipos de árboles, un tercio de las especies en tres tipos de árboles, etcétera.



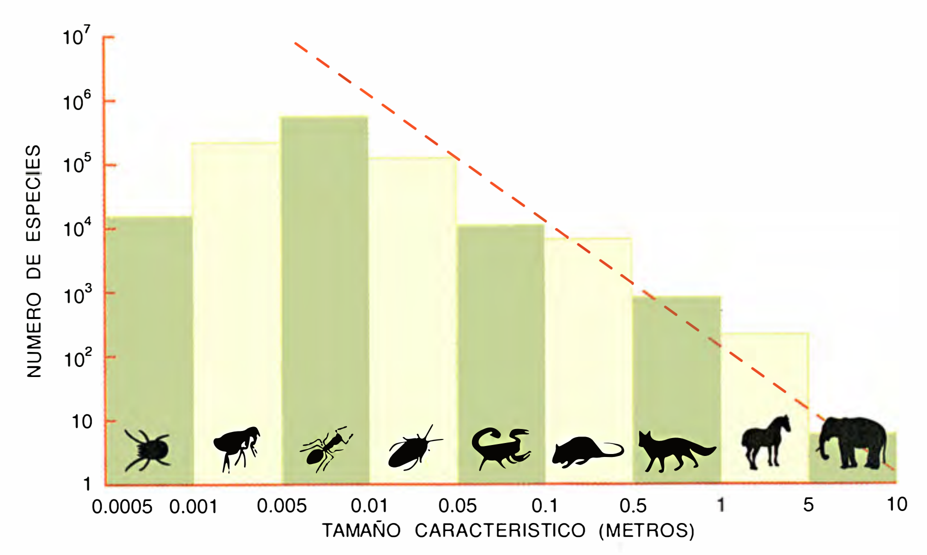
Los insectos que no son coleópteros suman alrededor del 60 por ciento de todas las especies de insectos. Terry L. Erwin cifró en unas 160 las especies de coleópteros especializadas en la bóveda de un tipo de tilo tropical. Si los coleópteros constituyen el 40 por ciento de la diversidad de los insectos, entonces debe haber 400 especies de insectos especializadas en estos árboles.



Otras partes del árbol (tronco, raíces y hojarasca caída) sirven también de lugar de acomodo de los insectos. Erwin estimó que dos tercios de todas las especies de insectos viven en la bóveda, lo que implicaría la existencia de 600 especies de ellos por especie arbórea.



En las selvas tropicales hay unas 50.000 especies de árboles. Si, por término medio, existen 600 especies de insectos asociadas a cada tipo de árbol, las selvas tropicales albergarían un número sorprendente de especies de insectos: 30 millones (50.000 por 600). Aunque se trata de una cifra provisional, parece más ajustado dividir ese número por cinco o más.



5. RELACION DE TAMAÑOS y su interpretación para barruntar el número de especies. En general, se mantiene de forma persistente el mayor predominio del número de especies de talla pequeña sobre el de animales grandes. Relación de la que se apartan los organismos de menos de un centímetro de longitud, quizá porque los taxónomos tienden a pasarlos por alto; pero si también se cumpliera en organismos muy pequeños, del orden de un milímetro, habría unos 10 millones de especies.

distintivas de ARN. La selección natural no actúa sobre las especies víricas, sino sobre el enjambre de cuasiespecies.

La contribución de los microorganismos y los nemátodos al acervo génico global puede ser sorprendente, por lo enorme. Cierta opinión arriesgada, aunque no irracional del todo, sostiene que cada especie de artrópodo y de planta vascular (que forman, en conjunto, la inmensa mayoría de las especies clasificadas) posee al menos un nemátodo, un protozoo, una bacteria y un virus, que la parasitan. Si ello fuera cierto, habría que multiplicar por cinco los recuentos hasta ahora presentados; el total podría sobrepasar los 100 millones. Me parece mucho.

Los recuentos de especies encierran su propio interés; constituyen éstas, en efecto, una medida tangible, y de fácil definición, de la singularidad genética. Pero al investigador le guían también otros afanes, ligados con la evolución o con fines prácticos, en su búsqueda de la diversidad en los niveles taxonómicos superiores o inferiores.

Si ascendemos en la escala taxonómica, de las especies a los géneros, las familias, los órdenes, las clases y los tipos, se nos ofrecen variaciones genéticas todavía más fundamentales. En ese contexto, no llega al 15 por ciento la proporción de especies conocidas que habitan en el océano; lo que no impide que más del 90 por ciento de todas las clases de organismos, y esencialmente todos los tipos, estén representados en el mar. La verdad es que dos tercios de todos los tipos se encuentran, de manera exclusiva, en el mar. Si atendemos, pues, a la gama de planes corporales de los organismos, el océano posee una diversidad mucho más rica que la tierra emergida.

En el otro extremo de la escala jerárquica, los conservacionistas se interesan por las diferencias genéticas entre los individuos de una misma especie. Para cuando una especie ha llegado al borde de la extinción, ha perdido ya buena parte de su diversidad genética, pérdida que no se subsana con programas de reproducción. Ello significa, pues, que el conocimiento de la diversidad en el seno de una misma especie nos aclara hasta qué punto las especies amenazadas se encuentran ya, o todavía no, en un camino sin retorno. La genética sugiere también si una especie estuvo cerca de la extinción en un pasado no muy lejano.

El avanzar en la catalogación de la vida exige un esfuerzo tenaz y coordinado. Pero vale la pena. Cada vez más, el mantenimiento de la diversidad nos pedirá intervenir en los ecosistemas y gestionarlos, así como decidir dolorosamente dónde habrá que concentrar tales esfuerzos, en detrimento de otros. Para acometer esas acciones habrá que contar con mejor información que la actualmente disponible.

El ser humano necesita conocer la diversidad de los organismos —su número y razón— por idéntico motivo por el que inquiere el origen y el destino del cosmos o cartografía la secuencia de las moléculas que componen el genoma humano determinante de nuestra constitución personal. Pero, a diferencia de esas cuestiones, en ésta de la diversidad y su conservación el tiempo apremia. Cada año se arrasa del uno al dos por ciento de selva tropical para roturar campos y aprovechar la madera para combustible y otros fines. A esa cadencia, no habrá bosques tropicales de aquí a cincuenta años.

La premura de tiempo obliga a idear vías imaginativas para catalogar la diversidad. Así, podríamos pensar en la incorporación de personas, no profesionales, capaces de recolectar y clasificar los especímenes con técnicas rudimentarias, aunque eficaces. Acopian la mayor parte de la información deseada en una fracción del tiempo que se precisaría para satisfacer los cánones del saber tradicional. En esta línea, en el marco de programas pioneros de investigación taxonómica simplificada en Costa Rica, trabajan Rodrigo Gámez y otros del Instituto de Biodiversidad.

Otros recurren a la alta tecnología. Los expertos recogen, almacenan y distribuyen la información sobre las especies en disquetes de ordenador. Se inventan programas adecuados para contrastar la observación de una especie con la base de datos organizada; de todo ello resultará una drástica revolución en el proceso de deslindar y clasificar nuevas especies, tarea que consume mucho tiempo. Las imágenes de referencia podrían transformarse en hologramas al alcance del usuario. La base de datos centralizada australiana ofrece ya algunas de estas prestaciones. Si se generaliza su empleo y se aplica con imaginación, la tecnología de la información permitiría que las colecciones de las instituciones europeas (el legado de los imperios) fueran accesibles a los investigadores, generalmente mal equipados, de los trópicos.

Las generaciones futuras lamentarán el escaso esfuerzo dedicado a la cuantificación y conservación de las formas de vida que definen la gloria sin par de la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FROM GENES TO ECOSYSTEMS: A RESEARCH AGENDA FOR BIODIVERSITY. Informe de IUBS-SCOPE-UNESCO. Dirigido por Otto T. Solbrig. International Union of Biological Scientists. París. 1991.

TAXONOMY OF TAXONOMISTS. Kevin J. Gaston y Robert M. May en *Nature*, vol. 356, n.º 6367, págs. 281-282. 1992.

Criptografía cuántica

Los matemáticos llevan milenios tratando de hallar un sistema que consienta intercambios de mensajes en secreto absoluto. La mecánica cuántica ha sumado fuerzas con la criptología para lograr grandes avances hacia tal empeño

Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur K. Ekert

Edgar Allan Poe fantasea, en *El escarabajo de oro*, sobre los rudimentos de la fractura de claves criptográficas y aventura, en ese relato corto de 1843, que la mente humana conseguirá descerrojar cualquier código que su ingenio pueda concebir. A lo largo del siglo y medio transcurrido, la batalla entre creadores y descifradores de claves ha sufrido vaivenes y complicaciones que hubieran hecho las delicias de Poe. En 1918 se ideó una codificación invulnerable, aunque su invulnerabilidad no fue demostrada hasta los años cuarenta. Era aquel sistema de cifrado muy poco práctico, pues exigía que destinatario y remitente conviniesen una clave de antemano, una gran ristra de números secretos generados al azar, parte de los cuales se utilizaba cada vez que se transmitía un mensaje. En el decenio de 1970 se desarrollaron sistemas más prácticos, fundados en claves breves y reutilizables, e incluso carentes por completo de claves secretas; permanecen en el limbo matemático, sin haber sido fracturados ni haberse demostrado su invulnerabilidad.

Un desarrollo tan reciente como inesperado ha consistido en reclamar el concurso de la mecánica cuántica para lograr proezas criptográficas inalcanzables por medios puramente matemáticos. Los dispositivos de criptografía cuántica se valen de fotones individuales y sacan provecho del principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual toda medida efectuada en un sistema cuántico provoca una perturbación en él, por lo que la información que proporciona sobre el estado que poseía el sistema antes de la medición es incompleta. Y así, toda escucha furtiva de un canal de comunicaciones cuántico provoca inexorablemente perturbaciones que ponen sobre aviso a los usuarios legítimos. La criptografía cuántica aprovecha tal efecto para posibilitar una comunicación secreta entre dos personas, aunque éstas no se hayan encontrado nunca ni compartan información secreta previa. Las técnicas cuánticas son también de utilidad para conseguir objetivos criptográficos más sutiles, de gran interés en el mundo posterior a la guerra fría; por ejemplo, el de capacitar a dos partes que desconfían una de otra para alcanzar decisiones conjuntas basadas en información reservada, sin poner en peligro su confidencialidad o hacerlo en el grado mínimo posible.

CHARLES H. BENNETT, GILLES BRASSARD y ARTUR K. EKERT comparten un mismo interés por las conexiones fundamentales existentes entre la física y la teoría de computación. Bennett y Brassard abanderan la avanzadilla de la criptografía cuántica. Bennett trabaja desde 1973 en el Centro Thomas J. Watson, de IBM. Brassard es profesor de informática en la Universidad de Montreal. Ekert, que se doctoró el año pasado por la Universidad de Oxford, está adscrito al Merton College oxoniense.

El arte de la criptografía nació hace al menos 2500 años; desde entonces ha desempeñado un papel importante en el devenir histórico. Es posible que uno de los más célebres criptogramas, la Nota Zimmermann, determinase la participación de los Estados Unidos en la primera guerra mundial. Al ser fracturada su clave y descifrado el texto, los estadounidenses se enteraron de que Alemania instaba a México a sumarse a su bando, ofreciendo en contrapartida, ganada la guerra, territorios del norte.

Más o menos por entonces, Gilbert S. Vernam, de la compañía American Telephone and Telegraph, y el comandante Joseph O. Mauborgne, del Cuerpo de Señaleros del Ejército estadounidense, pusieron a punto la primera codificación invulnerable, hoy conocida por cifrado Vernam. Una peculiaridad distintiva del código Vernam es que requiere una clave al menos tan larga como el mensaje que se está transmitiendo, clave que ya no se vuelve a utilizar nunca para enviar otro mensaje. (El cifrado Vernam se conoce también por "cuaderno de un solo uso", por ser habitual proporcionar la clave a los espías en forma de cuaderno de hojas arrancables, cada una de las cuales se utilizaba una sola vez y era después cuidadosamente destruida.) El descubrimiento del cifrado Vernam no provocó demasiado revuelo en su momento, tal vez porque la invulnerabilidad de tal codificación no quedó demostrada hasta pasado mucho tiempo y a causa también de que lo voluminoso de la clave la tornaba poco práctica para uso general.

Por culpa de tal limitación, los militares y diplomáticos continuaron fiando en sistemas de codificación mucho más vulnerables pero que se valían de claves mucho más breves. El resultado fue que, durante la segunda guerra mundial, los aliados pudieron leer la mayor parte de los mensajes secretos transmitidos por alemanes y japoneses. Tales sistemas de cifrado, aunque vulnerables, no eran en absoluto fáciles de decodificar; tanto es así que la formidable tarea de fracturar sistemas de cifrado más y más refinados constituyó uno de los acicates para el desarrollo de las computadoras electrónicas.

El interés del mundo académico por la criptografía cobró intensidad en el ecuador de los años setenta, cuando Whitfield Diffie, Martin E. Hellman y Ralph C. Merkle, de la Universidad de Stanford, descubrieron el principio de criptosistema de clave pública (CSCP). Poco más tarde, en 1977, Ronald L. Rivest, Adi Shamir y Leonard M. Adleman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, idearon un procedimiento efi-

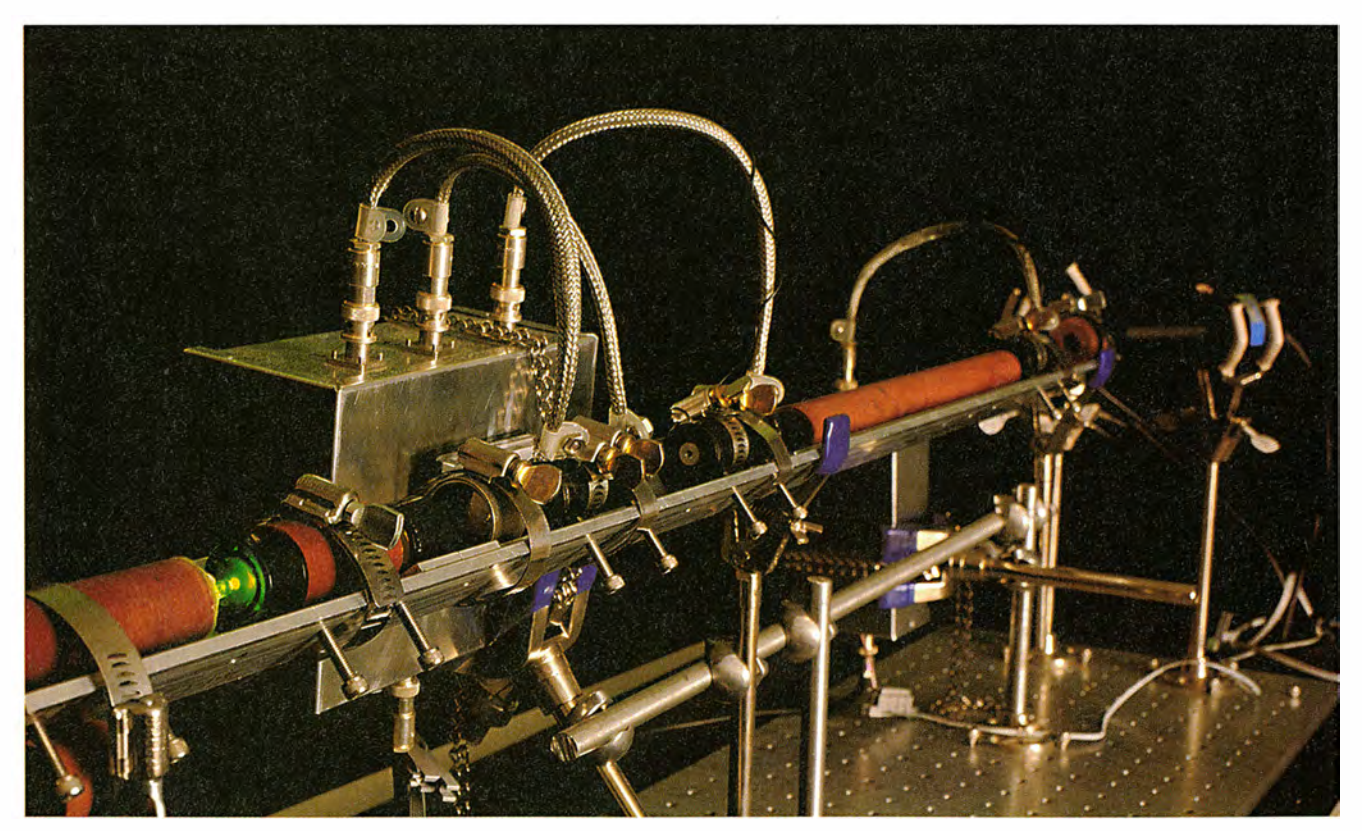
caz para llevar a la práctica tal sistema.

Los criptosistemas de clave pública se diferencian de todos los esquemas anteriores en que las partes que desean comunicarse no necesitan convenir antes una clave secreta. La idea del CSCP es que una usuaria, a la que llamaremos Alicia, elige a su voluntad una pareja de transformaciones inversas una de otra, que utilizará para la codificación y la decodificación. Otro usuario, sea Benito, puede servirse entonces del algoritmo público de codificación de Alicia para preparar un mensaje que sólo ella pueda descifrar. Análogamente, todo el mundo, Alicia incluida, puede servirse del algoritmo público de codificación elegido por Benito para preparar un mensaje que sólo éste pueda descifrar. Así pues, Alicia y Benito pueden conversar en secreto, a pesar de no compartir ningún secreto. Los criptosistemas de clave pública resultan ideales para la codificación de correo electrónico y de transacciones comerciales, comunicaciones entre partes que, a diferencia de diplomáticos y espías, no tienen prevista de antemano la necesidad de comunicarse en secreto.

Frente a tales ventajas, los CSCP ofrecen un inconveniente: no está del todo demostrado que sean verdaderamente seguros. De hecho, Shamir, del Instituto Weizmann para las Ciencias, consiguió fracturar en 1982 uno de los primeros criptosistemas de clave pública, la llamada "cifra mochila".

Varios años antes de descubrirse la criptografía de clave pública se había producido otro llamativo descubrimiento: la unión de la criptografía con la mecánica cuántica. Hacia 1970, Stephen J. Wiesner, de la Universidad de Columbia, escribió un artículo titulado "Conjugate Coding" ("Codificación conjugada") donde exponía la forma en que podría ser utilizada la mecánica cuántica, al menos en principio, para cumplir dos tareas imposibles desde la perspectiva de la física clásica. Consistía una de ellas en producir billetes bancarios físicamente imposibles de falsificar; la otra era un plan de combinación de dos mensajes clásicos en una sola transmisión cuántica, a partir de la cual el destinatario podría extraer uno y otro de los mensajes, pero no ambos. El artículo de Wiesner fue rechazado por la revista a la que lo presentó y permaneció inédito hasta 1983. En el ínterin, dos de los autores (Bennett y Brassard), conocedores de las ideas de Wiesner, comenzaron a pensar en combinarlas con los sistemas criptográficos de clave pública. Pronto nos percatamos de que podrían reemplazar a los CSCP: dos usuarios, que inicialmente no comparten secreto alguno, podrían comunicarse reservadamente, pero ahora podían hacerlo con seguridad absoluta y demostrable, avalándolo así las leyes físicas aceptadas.

Nuestros primeros esquemas cuántico-criptográficos, desarrollados entre 1982 y 1984, pecaban de poco prácticos; pero los refinamientos conseguidos en los años siguientes culminaron en 1989 con la puesta en servicio, en el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de un prototipo plenamente operativo. John Smolin ayudó a construir los equipos electrónicos y ópticos del aparato y François Bessette y Louis Salvail colaboraron en la confección de los programas. Más o menos por entonces, las nociones teóricas de David Deutsch, de la Universidad de Oxford, llevaron a uno de nosotros (Ekert) a concebir un sistema criptográfico ligeramente distinto, basado en correlaciones cuánticas. A principios de 1991, aplicando ideas de Massimo Palma, de la Universidad de Palermo, John Rarity y Paul Tapster, de la Agencia Británica de



1. DISPOSITIVO CUANTICO que genera y mide destellos sumamente débiles de luz polarizada. El dispositivo proporciona una vía segura de transmisión de información. La intensidad media de cada destello es sólo de una décima de fotón.

Investigación para la Defensa, emprendieron experimentos que llevaban a la práctica el criptosistema ideado por Ekert.

Para explicar el funcionamiento de tales sistemas es preciso describir con detalle algo mayor ciertos aspectos matemáticos de la criptografía clásica, y en especial, el rol desempeñado por la clave. En los primeros días de la criptografía, la seguridad de los sistemas de cifrado estaba determinada por la discreción con que se efectuase el proceso completo de codificación y decodificación. En la actualidad, tales procedimientos suelen ser de conocimiento público; lo que se conserva en secreto es la clave. En tales sistemas de codificación la clave se utiliza para controlar y adaptar a la medida de cada usuario los procesos de codificación y decodificación, de modo tal que un adversario que haya interceptado el criptograma no pueda, falto de la clave, extraer del mismo ninguna información útil relativa al mensaje original, por muy bien que conozca el procedimiento general de codificación. Consiguientemente, el criptograma podría ser difundido por un canal de uso público; podría, por ejemplo, ser radiado o publicado en la prensa. La clave, empero, ha de ser enviada por conducto reservado y muy seguro. Aunque la distribución de una clave mediante canales privados pueda ser onerosa, permite la posterior comunicación secreta a través de canales públicos económicos.

En última instancia, la seguridad de un criptograma depende de la longitud de la clave. En dos brillantes artículos publicados en los años cuarenta, Claude E. Shannon, de los Laboratorios Bell, demostraba que, si la clave es más breve que el mensaje que con ella se está codificando, un adversario hábil podría inferir alguna información sobre el mensaje. Tal fuga de información se produce independientemente de lo enrevesado que pueda ser el proceso de codificación. El mensaje puede, por el contrario, quedar completa e incondicionalmente oculto y protegido de fisgones mediante sistemas como la codificación Vernam; en éste, la clave es tan larga como el mensaje, aleatoria y utilizada una sola una vez.

Pero incluso la seguridad del cifrado Vernam está limitada por la que ofrezca la distribución y almacenamiento de la clave. En vista de la gran dificultad de suministrar nuevas claves para cada mensaje, el cifrado Vernam no resulta práctico para uso

El cifrado de Ché Guevara

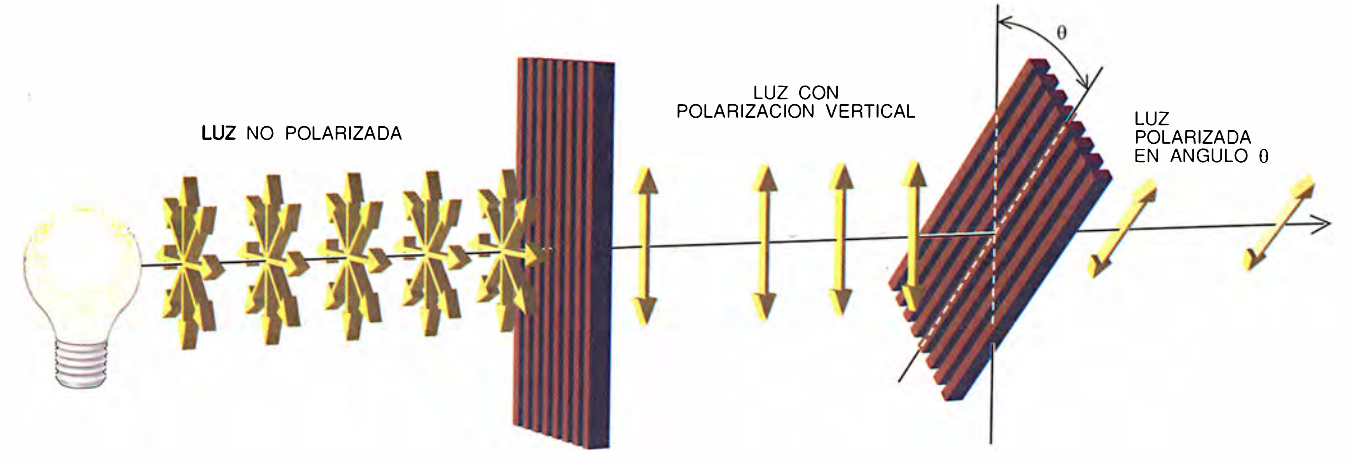
En 1967, cuando el ejército boliviano capturó y ejecutó a Ché Guevara, hallaron en su bolsillo una planilla que mostraba la forma en que preparaba los mensajes que habrían de transmitirse a Fidel Castro. Guevara utilizaba el cifrado invulnerable inventado por Gilbert Vernam en 1918. Las letras del mensaje del Ché fueron traducidas primero a cifras de uno o dos guarismos mediante una regla fija, a saber:

A 6	E 8	I 39	M 70	Q 71	U 52	Y 1
B 38	F 30	J 31	N 76	R 58	V 50	Z 59
C 32	G 36	K 78	O 9	S 2	W 56	
D 4	H 34	L 72	P 79	T 0	X 54	

Por sí solo, este procedimiento no supone prácticamente ninguna protección. Los guarismos del mensaje fueron seguidamente agrupados en bloques de cinco dígitos y llevados a la línea superior de cada grupo de tres líneas de la planilla. La línea central de cada grupo es la clave, una sucesión de dígitos aleatorios que solamente conocían Guevara y Castro.

A continuación, se sumaba el mensaje y la clave (sin llevar) generando un criptograma constituido por la tercera línea de cada grupo de tres. Por haberse sumado dígitos aleatorios, el propio criptograma forma una sucesión aleatoria de guarismos, que no aporta información relativa al mensaje original salvo para quienes conozcan la clave. El criptograma se transmitía por fin a Cuba mediante un canal inseguro, por ejemplo, radio de onda corta. El destinatario, la sección de cifrado de Castro, habría restado la misma serie de dígitos aleatorios de la clave, reconstruyendo la sucesión numérica de la primera hilera y habría traducido los números a las letras que constituían el mensaje.

Muchos espías y diplomáticos han utilizado la codificación Vernam a lo largo del siglo XX. En lugar de guarismos decimales, la clave puede consistir en una larga ristra de dígitos binarios, 0 y 1, y las sumas y restas pueden ser realizadas en base 2 y a máquina, en vez de hacerlo manualmente en base 10. Sin embargo, sigue siendo necesario portar en mano la clave desde el lugar donde es generada hasta los puntos de uso y ser cuidadosamente guardada durante todas las fases de entrega y almacenamiento, para evitar que caiga en manos de un adversario.



2. LA LUZ NO POLARIZADA entra en un filtro, que absorbe parte de la luz y confiere al resto polarización vertical. Un segundo filtro, inclinado en cierto ángulo, absorbe parte de la luz verticalmente polarizada y transmite el resto.

comercial general, aun cuando se emplee de manera rutinaria en las comunicaciones diplomáticas, como las intercambiadas a través del "teléfono rojo" entre Moscú y Washington. Por contra, el cifrado comercial corriente, Data Encryption Standard (o brevemente, DES), se funda en una clave de 56 bits, que es reiteradamente utilizada para efectuar muchas codificaciones a lo largo de un período de tiempo. Este sistema simplifica el problema de la distribución y almacenamiento de una clave segura, pero no lo elimina.

Subsiste a pesar de todo una dificultad. En principio, todo canal privado clásico es susceptible de supervisión pasiva, sin que remitente ni destinatario se percaten de ello. Por ejemplo, una clave portada por un correo de confianza podría leerse en ruta con un escáner de rayos X de alta resolución o a través de otras refinadas técnicas de obtención de imágenes, y ello, sin conocimiento del correo. Con mayor generalidad, la física clásica —que se ocupa de cuerpos macroscópicos y de fenómenos como los documentos de papel, las cintas magnéticas o las señales de radio— consiente la medición de todas las propiedades de un objeto sin que tales propiedades resulten perturbadas. Dado que toda la información, incluidas las claves criptográficas, se encuentra codificada en propiedades físicas de objetos o señales, la teoría clásica deja abierta la posibilidad de supervisión pasiva, pues consiente al supervisor la medición de propiedades físicas sin perturbación de éstas.

No sucede lo mismo en la teoría cuántica, fundamento de la cuántico-criptografía. Se cree que la teoría cuántica gobierna todos los objetos, grandes y pequeños, pero sus consecuencias se hacen notar sobre todo en sistemas microscópicos, como los átomos o las partículas subatómicas. La acción de medir constituye parte integrante de la mecánica cuántica, a diferencia de la física clásica, donde es una acción positiva y externa. Cabe, pues, diseñar un canal cuántico, esto es, un canal que porta señales basándose en fenómenos cuánticos, de forma tal que toda tentativa de supervisión del canal provoque perturbaciones detectables en la señal. Tal efecto se da porque, en teoría cuántica, ciertas parejas de propiedades físicas son complementarias, lo que significa que la medición de una propiedad perturba necesariamente a la otra. Tal enunciado, conocido por principio de incertidumbre de Heisenberg, no se refiere meramente a las limitaciones de una determinada técnica de medición: es válido para toda medición posible.

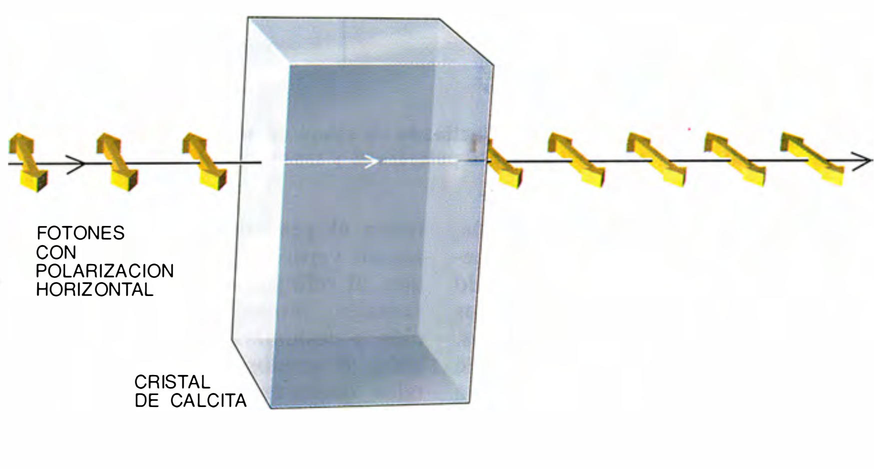
Podemos aplicar el principio de incertidumbre a la creación de un canal seguro basado en las propiedades cuánticas de la luz. La unidad mínima o cuanto de luz es el fotón, al que podemos imaginar como un campo eléctrico diminuto y oscilante. La dirección de la oscilación se denomina polarización del fotón. La luz ordinaria está formada por fotones que poseen muchas polarizaciones diferentes. Pero si la luz atraviesa un filtro polarizador, como los utilizados en algunas gafas de sol, solamente podrán pasar a su través los fotones que posean cierta polarización. La polarización transmitida depende de la orientación del filtro. En las gafas de sol, los filtros se hallan orientados de manera que permitan el paso de la luz con polarización vertical, porque esa luz es la que, al reflejarse de superficies horizontales, provoca menor reverberación y deslumbramiento. Al girar las gafas 90 grados, con lo que los cristales quedarán no al mismo nivel, sino uno directamente encima del otro, la luz transmitida con preferencia será la de polarización horizontal, lo que acentúa la reverberación en vez de amortiguarla.

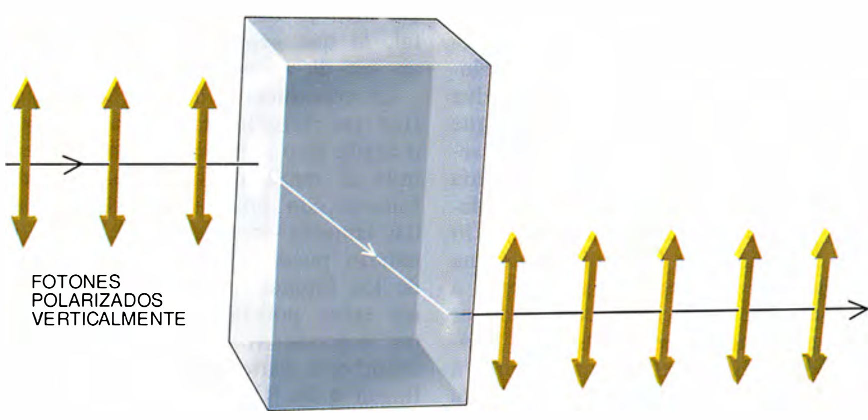
La construcción de un canal cuántico requiere un filtro polarizador o algún otro método idóneo que permita al remitente la preparación de fotones con polarización determinada; también es preciso que el destinatario pueda medir la polarización de los fotones que recibe. Esta última tarea podría encomendársele a un segundo filtro polarizador, que absorbería parte de los fotones que llegan a él. Una solución más conveniente consiste en utilizar un cristal birrefringente (la calcita) que encamina los fotones incidentes por una de dos posibles rutas, según su polarización, sin absorberlos.

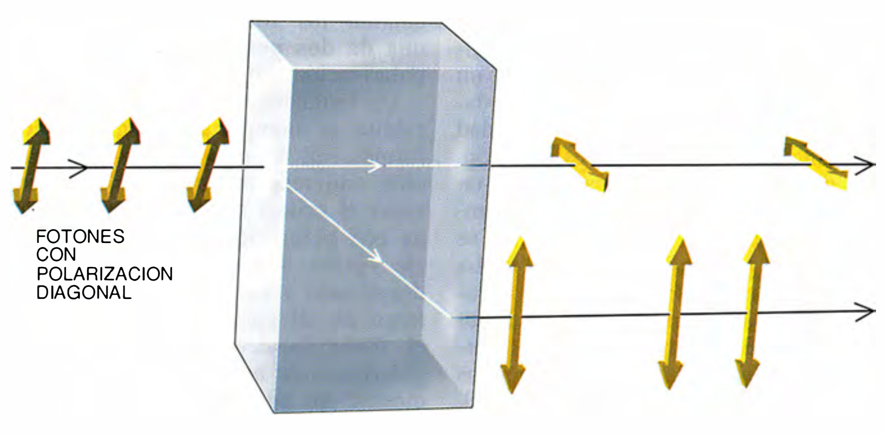
Un fotón incidente en un cristal de calcita se comporta de una de dos formas, en función de su polarización con respecto al cristal: o atraviesa el cristal directamente y emerge con polarización perpendicular al eje óptico del mismo, o bien sale desplazado y emerge polarizado a lo largo de tal eje. En el caso de que el fotón incidente se encuentre ya polarizado en una de estas dos direcciones, no sufrirá cambio de polarización y se verá determinísticamente encaminado a la ruta directa (o a la desplazada, según). Sin embargo, un fotón que incida en el cristal con polarización intermedia tiene cierta probabilidad de ser asignado

a cada uno de los dos haces y quedará polarizado según el haz que le haya correspondido, perdiendo con ello su polarización primitiva. La conducta más aleatoria se da cuando la polarización del fotón biseca exactamente a las direcciones de polarización del cristal, esto es, cuando forma con ellas 45 o 135 grados. Tales fotones tienen la misma probabilidad de ingresar en uno u otro haz, por lo que no revelan nada acerca de su polarización original, perdiendo, por así decirlo, todo recuerdo de ella.

Supongamos que Benito esté informado de antemano de que un fotón dado se encuentra polarizado en una de las dos direcciones "rectilíneas", vertical (90 grados) u horizontal (0 grados), pero no sepa específicamente en cuál de ellas. Puede entonces determinar fiablemente de qué dirección se trata enviando el fotón a un instrumento consistente en un cristal de calcita con orientación vertical más dos detectores, por ejemplo, dos tubos fotomultiplicadores, capaces de registrar la llegada de fotones individuales. El cristal de calcita encaminaría al fotón incidente hacia el detector de lo alto si aquél estuviera polarizado horizontalmente y, hacia el detector de abajo, de estarlo verticalmente. Tal aparato no serviría para detectar fotones "diagonales" (orientados a 45 o 135 grados), que pueden a su vez reconocerse mediante un aparato similar girado 45 grados con respecto a la orientación del primero. El aparato girado es incapaz de distinguir los fotones horizontales de los verticales. De acuerdo con el principio de incertidumbre, tales limitaciones valen no sólo para el aparato concreto de medida aquí descrito, sino también para cualquier dispositivo de medición, sea el que fuere. Las polarizaciones rectilínea y diagonal constituyen propiedades complementarias, en el sentido de que la medición de una de las dos introduce un elemento de azar en la otra.







3. UN CRISTAL DE CALCITA permite la discriminación de los fotones polarizados vertical y horizontalmente. Los fotones con polarización horizontal atraviesan directamente el cristal; los de polarización vertical experimentan una deflexión que los desplaza. Cuando llegan al cristal fotones con polarización oblicua quedan repolarizados al azar en dirección horizontal o vertical y sufren el desplazamiento correspondiente.

Ya es posible describir el sencillo plan de distribución de claves por medios cuánticos, propuesto en 1984 por dos de los autores (Bennett y Brassard), al que bautizamos "BB84". La finalidad de aquel esquema era permitir que Alicia y Benito se intercambiasen una clave aleatoria secreta, posteriormente utilizable a la manera del cifrado Vernam, para enviar, llegado el caso, mensajes secretos inteligibles. Lo mismo que otros esquemas cuánticos para distribución de claves, el BB84 recurre a un canal cuántico, a través del cual Alicia y Benito envían fotones polarizados, en conjunción con un canal público clásico, por el que envían mensajes "llanos" ordinarios. Una escucha no autorizada, a la que llamaremos Esther, es libre de medir los fotones del nivel cuántico, pero no puede hacerlo sin perturbarlos. Aunque cabe también que Esther llegue a conocer el contenido completo de los mensajes enviados por el canal público, supondremos provisionalmente que Esther no tiene capacidad para perturbar ni alterar tales mensajes.

Alicia y Benito se sirven del canal público para comentar y comparar las señales enviadas por el canal cuántico, verificando si existen pruebas de inspección por terceros. De no hallarlas, pueden destilar de sus datos un cuerpo de información que es certificablemente compartido, aleatorio y secreto, con independencia del refinamiento técnico de Esther y de

la capacidad informática que tenga a su disposición. El esquema funciona como sigue:

En primer lugar, Alicia genera y envía a Benito una serie de fotones cuyas polarizaciones han sido elegidas al azar entre los valores 0, 45, 90 y 135 grados. Benito recibe los fotones y para cada uno de ellos va decidiendo, también al azar, si mide la polarización rectilínea o la diagonal.

A continuación, Benito anuncia públicamente qué tipo de medida ha efectuado para cada fotón (rectilínea o diagonal), pero no informa del resultado de la medida (por ejemplo, si ésta ha sido de 0, 45, 90 o 135 grados). También públicamente, Alicia le informa, para cada fotón, si la medida realizada ha sido la pertinente o no. Alicia y Benito desechan entonces todos los casos en que Benito haya efectuado mediciones improcedentes más los casos en que sus detectores no han llegado a detectar la llegada de un fotón (la eficiencia de los existentes no es del ciento por ciento). En el caso de que nadie haya fisgoneado en el canal cuántico, las polarizaciones restantes constituirían la información secreta compartida por Alicia y Benito.

Alicia y Benito verifican ahora si han sido objeto de inspección por terceros, lo que pueden hacer, por ejemplo, comparando públicamente un subconjunto entresacado al azar de la serie de datos de polarización, subconjunto que luego se desecha. Si la verificación denuncia la presencia de escuchas, Alicia y Benito eliminan todos sus datos y repiten el proceso con una nueva tanda de fotones; en caso negativo, adoptan las polarizaciones restantes, que nunca han sido públicamente mencionadas, con carácter de bits secretos compartidos, interpretando como ceros los fotones con polarización horizontal o de 45 grados, y como unos los fotones verticales o polarizados a 135 grados.

Distribución cuántica de claves

Un sistema de criptografía cuántica permitiría que dos personas, Alicia y Benito, intercambiasen una clave secreta. El sistema dispone de un transmisor y un receptor. Alicia utiliza el transmisor para enviar fotones polarizados en una de cuatro posibles direcciones: 0, 45, 90 y 135 grados. Benito se vale del receptor para medir la polarización. Según las leyes de la mecánica cuántica, el receptor puede distinguir entre polarizaciones rectilíneas (0 y 90), o ser reconfigurado para distinguir polarizaciones diagonales (45 y 135); empero, no es capaz nunca de discriminar ambos tipos a la vez. La distribución de claves comporta varias etapas. Alicia envía fotones, cada uno con una de cuatro polarizaciones, elegidas por ella al azar.



Para cada fotón, Benito opta, también al azar, por uno de los dos tipos de medida, ora rectangular (+), ora diagonal (×).



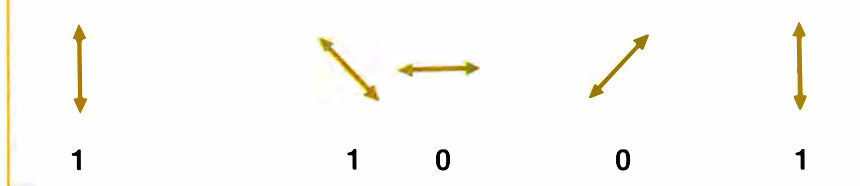
Benito va registrando el resultado de cada medida, y conserva el registro en secreto.



Benito anuncia abiertamente el tipo de medidas que ha realizado y Alicia le dice cuáles han sido del tipo correcto.

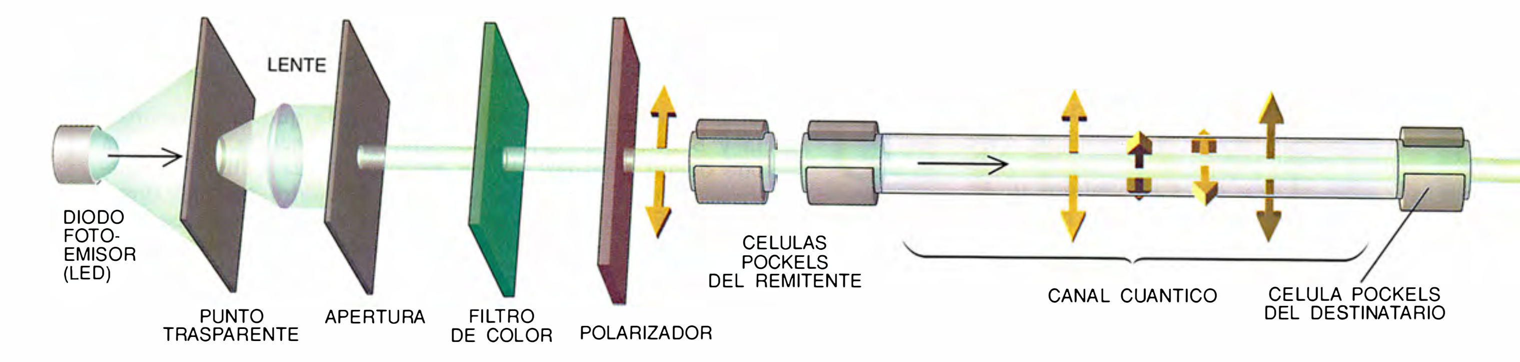


Alicia y Benito conservan todos los casos en que Benito efectuó la medición de tipo correcto. Estos casos son traducidos a bits (unos y ceros) que desde ese momento se convierten en la clave.



En virtud del principio de incertidumbre, Esther no puede medir ambas polarizaciones, rectilínea y oblicua, de un mismo fotón. En caso de que, para un fotón particular, la medición efectuada sea incorrecta, aunque luego envíe a Benito un fotón coherente con el resultado de su medida, habrá introducido elementos aleatorios en la serie de polarizaciones enviadas por Alicia. El efecto neto será provocar errores en la cuarta parte de los bits de aquellos datos de Benito que hayan sido objeto de inspección ilegítima.

El procedimiento explicado, que consiste en la comparación directa de bits seleccionados para ver si hay errores, no es muy eficiente. Son demasiados los bits a sacrificar para alcanzar una razonable seguridad de que los datos de Alicia y de Benito son idénticos, sobre todo si la escucha no ha sido continua, sino esporádica, y ha producido sólo unos cuantos errores. Una idea muy superior consiste en que Alicia y Benito comparen la "paridad" (si el número de elementos es par o non) de un subconjunto aleatorio públicamente convenido que contenga alrededor de la mitad de los bits de sus datos. Alicia, por ejemplo, podría decirle a Benito: "He examinado los bits primero, tercero, cuarto, noveno, 996 y el 999 de mis 1000 bits de datos, y he hallado que hay un número par de unos en esa colección." Benito contaría entonces el número de unos que ocupan en su serie esas mismas posiciones. Si descubriera un número impar de unos podría deducir que sus datos difieren de los de Alicia. Se puede demostrar que, en el caso de que los datos de Alicia



4. UN SISTEMA CUANTICO permite la distribución de información en secreto absoluto. El transmisor produce débiles destellos de luz verde generada por un diodo fotoemisor. El punto transparente, la lente y el filtro crean un haz colimado de destellos tenues. A continuación, la luz es polarizada horizontalmente. Dos células Pockels modulan la polarización a 0, 45, 90 o 135 grados. Los destellos de luz polarizada salen del transmisor del remitente y acaban alcanzando el receptor del destinatario. Otra célula Pockels deja intacta la polarización o le imprime un giro de 45 grados. La acción de esta célula Pockels permite al destinatario optar por medir la polarización rectilínea o la polarización oblicua. En el caso rectilíneo,

y de Benito sean diferentes, la comparación de la paridad de un subconjunto aleatorio permitirá detectar tal hecho con probabilidad 1/2, independientemente del número y ubicación de los errores. Basta repetir la prueba 20 veces con otros tantos subconjuntos aleatorios distintos para reducir la probabilidad de error indetectado a menos de uno por millón.

El esquema BB84 hubo de modificarse con el fin de producir en IBM un equipo cuántico-criptográfico operativo. Las modificaciones fueron necesarias para afrontar problemas prácticos, como el ruido de los detectores, o que el prototipo no utiliza en realidad fotones individuales, sino débiles destellos luminosos.

El canal cuántico, con el aparato emisor de Alicia en un extremo y el equipo receptor de Benito en el otro, ha sido alojado en una cámara oscura. Durante el funcionamiento, el sistema está controlado por un ordenador personal provisto de programas representativos de Alicia, Benito y, opcionalmente, de Esther.

La porción izquierda del aparato emisor de Alicia consta de un diodo fotoemisor de luz verde, una lente, un orificio diminuto y un sistema de filtros polarizadores que proporcionan un haz colimado de luz polarizada horizontalmente. A continuación, unos dispositivos optoelectrónicos conocidos por células Pockels permiten cambiar, bajo control de Alicia, la primitiva polarización horizontal a cualquiera de los cuatro estados de polarización preconvenidos. Su efecto equivale al de girar mecánicamente el filtro polarizador, pero puede realizarse mucho más rápidamente.

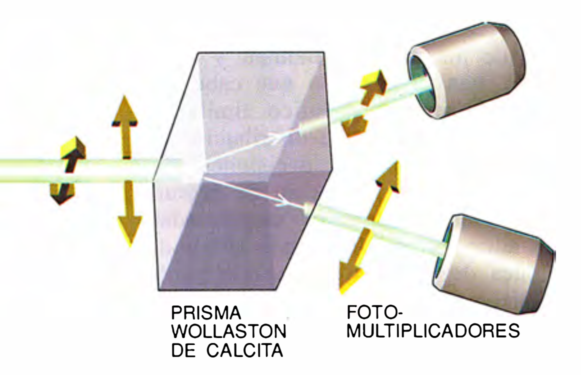
El equipo receptor de Benito, en el otro extremo, contiene una célula Pockels similar que le permite elegir el tipo de polarización que desea medir sin necesidad tampoco de hacer girar materialmente su detector. En cuanto el haz atraviesa la célula Pockels de Benito, es escindido mediante un prisma de calcita en dos haces perpendicularmente polarizados, que son dirigidos a dos tubos fotomultiplicadores al objeto de detectar fotones individuales.

Los equipos emisor y receptor del prototipo están separados tan sólo unos 30 centímetros con el fin, sobre todo, de que el artilugio quepa sobre una mesa, mas nada impide en principio aplicar la misma técnica a distancias mucho mayores. Podrían, por ejemplo, efectuarse transmisiones cuánticas por fibra óptica hasta distancias de algunos kilómetros; prescindiendo del costo y los inconvenientes que supondría la instalación, se podrían efectuar transmisiones cuánticas a distancias arbitrariamente grandes, con pérdidas despreciables, a través de un tubo donde se ha hecho el vacío. Ahora bien, la distribución cuántica de claves ha de competir con las técnicas clásicas, que a distancias grandes son mucho más económicas y capaces de ofrecer una seguridad suficiente.

Recordemos que el esquema BB84 codifica cada bit en un solo fotón polarizado, mientras que el prototipo lo hace en un tenue destello luminoso. Ello entraña un nuevo riesgo de escucha para el sistema: si Esther "pincha" el haz mediante un dispositivo similar a un espejo semirreflectante podrá escindir cada destello en dos de menor intensidad, uno de los cuales llega hasta Benito con su polarización intacta, reservándose ella el otro haz para su lectura. Si la fracción de haz desviada por Esther fuese muy modesta, es posible que Benito no detectase el debilitamiento de su señal, o que lo atribuyese a pérdidas naturales de la transmisión por el canal. Tal ataque puede ser eficazmente neutralizado, al costo de reducir la velocidad de transmisión por el canal cuántico, haciendo que los destellos emitidos por Alicia sean debilísimos, por ejemplo, de una intensidad media menor que un fotón por destello. Es fácil conseguir destellos de debilidad extrema eliminando con filtros casi toda la intensidad de los destellos brillantes.

Al utilizar destellos de tan baja intensidad, la posibilidad de que Benito detecte un fotón en un destello dado resulta reducida en proporción, pero la probabilidad de que Benito y Esther detecten a la vez fotones de un mismo destello se reduce muchísimo más, pues depende del cuadrado de la intensidad. El equipo disponible genera intensidades vecinas a una décima de fotón por destello. Por otra parte, si los destellos de Alicia fuesen mucho más brillantes (millares de fotones por destello, sea por caso) resultarían presa fácil del ataque por escisión del haz: sin más que desviar para sí una pequeña fracción de la intensidad, Esther dispondría aún de suficientes fotones de cada destello para efectuar las dos mediciones, rectilínea y diagonal, y determinar así la polarización correcta. Con otras palabras, cuanto más brillen los destellos de Alicia, tanto más se comportan éstos como señales clásicas, de las cuales puede el espía obtener información completa introduciendo en ellas una perturbación imperceptible.

Otro problema que presenta la realización práctica de un canal cuántico es que los detectores disponibles



los fotones dotados de polarización horizontal serán desviados hacia el fotomultiplicador de la derecha, mientras que los fotones de polarización vertical lo serán hacia el fotomultiplicador de la izquierda.

producen ocasionalmente respuesta positiva sin haber recibido ningún fotón. Tales "falsos recuentos", sumados a otras imperfecciones del instrumental, determinan errores a pesar de no haber existido escucha, ni interferencia, y hacen que sea poco práctico que Alicia y Benito procedan sin más a eliminar sus datos en cuanto hallen un error en ellos, como señalaba el protocolo ideal BB84. En el caso de que Alicia y Benito encuentren sólo un pequeño número de errores deben idear un método para corregirlos y proseguir. Por otra parte, si el número de los descubiertos fuese grande deberían rechazarlos y empezar de nuevo.

Benito y Alicia disponen de un repertorio de técnicas para corregir un pequeño número de errores comunicándose abiertamente. Pueden, por ejemplo, servirse de códigos de corrección de errores. Pero tales técnicas pudieran dejar escapar información a una Esther atenta a sus comunicaciones públicas. En consecuencia, tras la transmisión cuántica y la conversación de enmienda de errores, Alicia y Benito pudieran encontrarse con una clave corrupta o impura, un cuerpo de datos compartido que sólo es secreto en parte. Cabe que se haya filtrado hasta Esther información sobre la clave en diversas fases del proceso; puede ser que ésta haya conseguido información escindiendo algunos destellos, o por medición directa de algunos otros (no muchos, ya que provoca errores en los datos de Benito) y alguna más prestando oído a las comunicaciones públicas entre Alicia y Benito. Felizmente, como éstos conocen la intensidad de los destellos luminosos y el número de errores descubiertos y corregidos, pueden estimar cuánta es la información que se ha filtrado hasta Esther por todos estos conductos.

Una clave impura tal es, en sí, completamente inútil. De ser utilizada, pongamos por caso, como clave de un cifrado Vernam, podría resultar muy insegura, de darse la casualidad de que la parte sustantiva del mensaje coincidiera con la porción de clave conocida por el espía. Pero, por suerte, dos de los autores (Bennett y Brassard) en colaboración con Jean-Marc Robert pusimos a punto la "amplificación de privacidad". Merced a esta técnica matemática, Alicia y Benito pueden, comunicándose abiertamente, tomar esa clave semisecreta y destilar de ella una cantidad menor reservadísima, de la que el fisgón no conocería siquiera un bit. La idea esencial de la amplificación de privacidad es que Alicia y Benito, tras la intervención del fisgón, eligen públicamente una transformación que comprime la longitud de su clave impura de forma tal que el conocimiento parcial de la clave suministrada a la transformación produzca un conocimiento prácticamente nulo de la clave comprimida.

Supongamos que la clave a comprimir conste de 1000 bits, de los cuales Esther conoce a lo sumo 200. Alicia y Benito pueden todavía destilar por compresión casi 800 bits de información secretísima. Se puede demostrar que bastan para lograrlo técnicas sencillas; además, Alicia y Benito no necesitan saber cuál pueda ser la información parcial en manos del fisgón para elegir una función compresora de cuya salida Esther no posee información. En particular, basta que Alicia y Benito definan que cada bit de la salida ha de ser la paridad de un subconjunto independiente y públicamente convenido de los bits suministrados a la función, de forma muy similar a como habían hecho para adquirir una gran confianza en que sus datos cuánticos "en rama" eran idénticos (la diferencia es que ahora deben mantener secreta la paridad en lugar de compararla públicamente).

El problema de la seguridad de las claves no queda resuelto con las garantías en la seguridad de la distribución. En el almacenamiento de la clave tiene otro de sus puntos débiles. Suponiendo ya que Alicia y Benito hayan establecido la clave, es preciso que la guarden y conserven hasta que se demande. Ahora, cuanto más tiempo hayan de conservar la clave en su —digamos— "caja de seguridad secreta", tanto más vulnerable es a inspecciones no autorizadas. Aunque puede conseguirse que la caja de seguridad resulte difícil de abrir aplicando principios de ingeniería, según las leyes de la física cabe siempre la posibilidad de una brecha en la seguridad. Sorprendentemente, es posible diseñar un sistema criptográfico, basado en correlaciones cuánticas, capaz de garantizar tanto la seguridad de la distribución de claves como de su almacenamiento. El criptosistema se funda en la versión de David Bohm del célebre efecto Einstein-Podolsky-Rosen (efecto EPR).

El efecto EPR tiene lugar cuando un átomo que posee simetría esférica emite dos fotones en direcciones opuestas hacia sendos observadores, Alicia y Benito. El estado de polarización inicial de los dos fotones producidos es indefinido. Ahora bien, en razón de la simetría del estado inicial, si se miden las polarizaciones de los dos fotones los valores obtenidos han de ser opuestos (siempre que las mediciones sean del mismo tipo). Por ejemplo, si Alicia y Benito miden ambos la polarización rectilínea, ambos tienen idéntica probabilidad de registrar ya un 0 (polarización horizontal) ya un 1 (polarización vertical), pero si Alicia obtiene un 0, es seguro que Benito obtendrá un 1, y viceversa.

La faceta insólita e interesante del efecto EPR es que la polarización de ambos fotones queda determinada en cuanto uno de los fotones es objeto de medida, pero no antes. Así ocurre por muy alejados que puedan hallarse ambos fotones en ese momento. Esta explicación "clásica" del efecto EPR resulta un tanto contraria a la intuición; a decir verdad, todas las explicaciones clásicas del efecto EPR entrañan elementos implausibles, como la acción instantánea a distancia. Y sin embargo, el formalismo matemático de la mecánica cuántica explica con suma sencillez el efecto EPR, fenómeno, por otra parte, confirmado por vía experimental.

Uno de los autores (Ekert), valiéndose del efecto EPR, ha ideado un criptosistema que garantiza la seguridad tanto de la distribución como del almacenamiento de la clave. En una versión simplificada de este sistema, descrita por N. David Merman, de la Universidad Cornell, Alicia genera cierto número de pares fotónicos EPR, guardando para sí uno de los miembros del par y enviando el otro a Benito. Alicia y Benito proceden a medir algunos de sus fotones para comprobar si están sometidos a

espionaje, y almacenan los restantes sin medirlos. Más tarde, justamente cuando va a ser necesario utilizar la clave, miden y comparan algunos de los fotones almacenados. Si nadie ha manipulado los fotones "en conserva", Benito obtendrá siempre un 1 cuando Alicia obtenga 0, y viceversa. En el caso de que no aparezcan discrepancias, Alicia y Benito proceden a medir los fotones restantes para hacerse con la clave deseada.

Aunque este procedimiento funcione en teoría, no es posible su utilización práctica, porque no hay técnica capaz de almacenar fotones más allá de una pequeña fracción de segundo. El efecto EPR no consiente, pues, una certificación práctica de la seguridad del almacenamiento de claves.

Aunque la aplicación más conocida de la criptografía sea el secreto de las comunicaciones, es probable que en tiempos de paz haya otras dos aplicaciones de mayor importancia. La primera suscítase por el problema de la autenticación: la certificación de que el mensaje se ha enviado por quien dice remitirlo y no ha sufrido alteración en el tránsito. Consiste la segunda en el mantenimiento de la confidencialidad de información privada utilizada para llegar a decisiones públicas.

Desde que existen registros históricos, la autenticación ha sido fiada casi siempre a objetos materiales difíciles de copiar, como sellos o firmas. Tales recursos proporcionan una seguridad bastante pobre; además, no cabe utilizarlos en documentos electrónicos digitales —caso de las transacciones bancarias— que suelen transmitirse por líneas de telecomunicaciones apenas protegidas.

Existen, felizmente, diversas técnicas matemáticas para la autenticación de mensajes digitales. En 1979, Mark N. Wegman y J. Lawrence Carter, de IBM, descubrieron un sistema de autenticación digital que sí proporciona seguridad matemáticamente demostrable. Pero al igual que la codificación Vernam, es preciso que remitente y destinatario posean de antemano una clave secreta compartida, parte de la cual es utilizada cada vez que se certifica un mensaje.

La autenticación Vernam-Carter y la distribución cuántica de claves pueden beneficiarse recíprocamente. La técnica cuántica proporciona, por su parte, los bits constitutivos de la clave secreta que el método de certificación ha de consumir. El método de autenticación Vernam-Carter, por la suya, puede servir para llevar a cabo con éxito la distribución de claves, incluso en presencia de un adversario más poderoso, esto es, de una entidad capaz no sólo de escuchar los mensajes enviados por canales de comunicaciones públicas, sino también de alterarlos.

La criptografía cuántica puede resultar útil, asimismo, en la protección de información privada mientras se está utilizando en decisiones públicas. El ejemplo clásico a este respecto es el llamado "problema de la cita". Dos personas solteras buscan la forma de concertar una cita para salir juntos si y solamente si a cada una de ellas le agrada la otra, sin desvelar ninguna otra información. Por ejemplo, si Benito le gusta a Alicia, pero ésta no le es simpática a aquél, la cita no debe llegar a concertarse y además Benito no debe enterarse de que Alicia le mira con buenos ojos (por otra parte, es lógicamente inevitable que Alicia sepa que no le agrada a Benito, pues de ser así habrían concertado el encuentro).

Hay muchas otras situaciones en las que la decisión que han de tomar conjuntamente organizaciones gubernativas o societarias, o un individuo y una organización, dependen de datos particulares y reservados que las partes negociadoras no desean revelar. Una solución mediocre del problema de la cita, o de cualquier otro problema de decisión conjunta fundada en datos de carácter particular, consiste en que Alicia y Benito confíen sus datos particulares a un intermediario de confianza (Esther, sea por caso) y dejar que sea ésta quien tome la decisión. Saltan a la vista los riesgos de semejante proceder: Alicia y Benito han de confiar no sólo en que Esther tome la decisión correcta, sino además en que nunca llegue a revelar la información particular que les concierne.

Otras diversas técnicas permiten alcanzar decisiones públicas basadas en datos particulares sin el concurso de un intermediario de confianza. Por ejemplo, si el número de participantes es grande podría establecerse un protocolo que sólo fallase si una mayoría de los partícipes conspiran para hacer fracasar el resultado o desvelar los datos aportados. Por otra parte, si dos partes están convencidas de la seguridad de los sistemas criptográficos de clave pública, pueden llegar reservadamente a tomar decisiones sin intermediario alguno. En 1982, Andrew C.-C. Yao, por entonces en la Universidad de Stanford, abordó ya este problema.

Recientemente, Claude Crépeau, de l'École Normale Supérieure y del CNRS, y su discípula Marie-Hélène Skubiszewska, en colaboración con dos de los autores (Bennett y Brassard), han demostrado que cabe utilizar un aparato cuántico similar al ya construido para la distribución de claves en la toma de decisiones conjunta, sin intermediarios ni presunciones matemáticas no demostradas. La adopción de decisiones en condiciones de discreción absoluta puede realizarse por aplicación reiterada de un curioso procedimiento de procesado de información, conocido por transferencia olvididadiza. Tal procedimiento es una versión de la hazaña de Wiesner, consistente en enviar dos mensajes de tal modo que el destinatario pudiera leer uno cualquiera de ellos, pero no ambos. En 1981, Michael O. Rabin, de la Universidad de Harvard, formalizó la noción de transferencia olvidadiza, sin conocer los trabajos realizados por Wiesner un decenio antes, que no habían sido publicados. Más tarde, Crépeau, Joe Kilian (del Instituto de Tecnología de Massachusetts) y otros demostraron que la transferencia olvidadiza era aplicable para tomar decisiones reservadamente.

Una de las características más atractivas de la adopción cuántica de decisiones reservadas es que, a diferencia de la distribución de claves, importa incluso a pequeña distancia. Pero las formas conocidas de ponerla en práctica son matemáticamente bastante ineficientes y exigen el envío y recepción de muchos millares de fotones para alcanzar incluso decisiones sencillas. Si mejoramos su rendimiento matemático, la adopción reservada de decisiones podría convertirse en la principal aplicación práctica de la criptografía cuántica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE CODEBREAKERS: THE STORY OF SECRET WRITING. David Kahn. Macmillan, 1967.

MODERN CRYPTOLOGY: A TUTORIAL. Gilles Brassard en *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 325. Springer-Verlag, 1988.

QUANTUM CRYPTOGRAPHY BASED ON BELL'S THEOREM. Artur K. Ekert in *Review Letters*, vol. 67, n.º 6, páginas 661-663; 5 de agosto de 1991.

EXPERIMENTAL QUANTUM CRYPTOGRAPHY. Charles H. Bennett, François Bessette, Louis Salvail y John Smolin en *Journal of Cryptology*, vol. 5, n.º 1, páginas 3-28; 1992.

QUANTUM CRYPTOGRAPHY WITHOUT BELL'S THEOREM. Charles H. Bennett, Gilles Brassard y N. David Mermin en *Physical Review Letters*, vol. 68, n.º 5, págs. 557-559, 3 de febrero de 1992.

El mal de altura

Numerosos escaladores sufren los síntomas, varios y sutiles, de este trastorno, capaz de resultar en un fatal desenlace. Pero no siempre es inevitable

Charles S. Houston

En la Nochevieja de 1960 llamó a mi puerta, en demanda de auxilio, un joven que había bajado esquiando de las cumbres cercanas a Aspen, Colorado, donde había dejado a su compañero enfermo. Se formó un grupo de rescate, y, a la tarde siguiente, el paciente era conducido a un hospital para curarle lo que, por la descripción de su amigo, pensé que sería una neumonía. Pero presentaba una acumulación de fluido en ambos pulmones, muy diferente de la inflamación típica de la neumonía.

Ante la rareza del caso, un distinguido cardiólogo me animó a publicar mis observaciones. El breve artículo resultante, aparecido en el *New England Journal of Medicine*, atrajo cientos de cartas que describían trastornos similares, relacionados con la altura, que habían recibido idéntico diagnóstico: neumonía. El descubrimiento de aquella nueva forma de mal de montaña que daría en llamarse edema pulmonar de altura espoleó mi vieja afición montañera y despertó mi interés por los problemas médicos asociados con las grandes alturas. En 1936, ya en pleno ejercicio de mi profesión, había acompañado a un equipo de alpinistas al Himalaya; allí encontré mi primer caso de mal de altura. No supe reconocerlo.

El edema pulmonar de altura y otros síntomas producidos por las altitudes causan problemas clínicos importantes. Mucha gente sale a la montaña para escalar, esquiar, caminar o disfrutar las vacaciones. La afición ha ido ganando adeptos con la mejora de las comunicaciones y la perfección de los equipos. Unas cifras de muestra: entre 1903 y 1912 sólo 42 montañeros intentaron alcanzar la cima de 6218 metros del monte McKinley, en Alaska, y ninguno lo consiguió; de 1988 a 1990 hubo 2923 conatos y 1659 éxitos. Paralelamente, el número de víctimas del edema pulmonar de altura ha aumentado: del catorce por ciento de los fallecimientos en el McKinley se ha culpado al mal de montaña.

La causa última del mal de montaña reside en la falta de oxígeno, la hipoxia. A medida que nos elevamos por encima del nivel del mar, disminuye la presión; y por ser constante el porcentaje de oxígeno en el aire, disminuye también la concentración de oxígeno. Los bajos niveles de oxígeno instan una serie de cambios fisiológicos de fatal pronóstico en potencia.

Sin embargo, la exposición prolongada a la altura, o a situaciones de falta de oxígeno experimentadas al nivel del mar, puede originar un proceso de aclimatación, ajuste merced al cual la gente sobrevive con niveles de oxígeno de suyo muy perjudiciales. La comprensión de los numerosos riesgos de la hipoxia, de las diferentes formas de mal de altura y del proceso de aclimatación resulta imprescindible para la seguridad personal en las imponentes montañas que coronan la Tierra.

Aunque sea muy reciente su definición como manifestación del mal de altura, el edema pulmonar de gran altitud no encierra ninguna novedad. En el año 403 a. C., Hui Jiao, cronista chino que recorría la Ruta de la Seda, anotaba así la enfermedad de su compañero de viaje: "El viento helaba hasta los huesos en la sombría vertiente norte de las Montañas Nevadas Menores. Hui Jing estaba grave, su boca espumeaba, perdía fuerzas muy aprisa y desfallecía aquí y allá. Finalmente, cayó muerto sobre la nieve."

Ciento cincuenta años después, el jefe mogol Mirza Mohamed Haidar describía el trastorno, a menudo devastador, que castigaba a sus tropas en campaña por el Altiplano Tibetano (por encima de los 4000 metros). Los síntomas iban desde debilidad y cortedad de aliento hasta alucinaciones, culminando en coma y, a menudo, en la muerte. A fines del siglo XVI, el sacerdote jesuita José Acosta se expresaba en términos parecidos a propósito del paso por un puerto elevado de los Andes.

Ni Hui Jiao, ni Haidar, ni el padre Acosta podían conocer la causa de esta enfermedad, porque hasta mediados del siglo XVII no se comprendió la naturaleza de la atmósfera de la Tierra. Fue entonces cuando una serie de experimentos realizados por Gaspar Berti, Evangelista Torricelli y Florin Périer demostraron que la atmósfera pesaba y que su presión decrecía con la altitud.

En el siglo XVIII, la gente empezó a aficionarse a la montaña. Los médicos comenzaron a definir clínicamente los efectos fisiológicos de la baja presión atmosférica. En 1786, algunos alpinistas ascendieron al Mont Blanc, de 4807 metros, la cima más alta de Europa. Durante la década siguiente, Horace-Bénédict de Saussure describió los efectos de la altitud sobre su corazón y respiración, y pronto se descubrió el importantísimo papel del oxígeno como soporte de la vida y de la combustión. A pesar de ello, continuó des-

CHARLES S. HOUSTON, antiguo profesor de medicina interna en la Universidad de Vermont, ama las montañas desde su primera ascensión alpina, en 1925. Once años después escaló el Himalaya y, en 1938, dirigió la primera expedición norteamericana al K2 (a 6611 metros). En la Marina de los Estados Unidos sirvió como cirujano aeronáutico y se especializó en grandes altitudes. En esas investigaciones continúa.

1. ESCALADOR en el Monte Fitzroy (3380 metros), en la Patagonia. El lento ascenso y las pausas de aclimatación permiten a los avezados evitar riesgos del mal de altura.



Hitos de la historia del montañismo

Los viajeros chinos llaman al Himalaya "montañas del dolor de cabeza"



35 a. de J. C.

Evangelista Torricelli

Gaspar Berti inventa el barómetro; Torricelli explota la idea.

1640 –1643

Joseph Priestley y Antoine Lavoisier describen el oxígeno y demuestran su necesidad para la combustión y la vida.



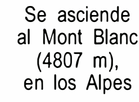
Joseph Priestley

1774 –1789



Los hermanos Joseph-Michel y Jacques-Étienne Montgolfier elevan el primer globo de aire caliente.

1783



Se asciende al Mont Blanc (4807 m), en los Alpes



1786



Paul Bert

Paul Bert y Angelo Mosso estudian los efectos de la hipoxia a gran altura.

1878 –1888

conociéndose la relación entre hipoxia y mal de montaña.

La edad de oro del alpinismo arranca de 1850, cuando el médico británico Albert Smith se dedicó a dar conferencias sobre su ascensión al Mont Blanc. Los montañeros se contaron, muy pronto, por miles, y al cabo de treinta años se habían conquistado todas las cimas alpinas. Algunos exploradores se encaminaron hacia el Himalaya y los Andes. Los vuelos en globo, iniciados cien años atrás, también estuvieron de moda, y los más atrevidos se elevaron a alturas suficientes como para conocer los trastornos.

El término "mal de altura" entró en la literatura popular y médica. Aparecieron relatos, con riebetes de exageración a menudo, que hablaban de los síntomas que atormentaban a los montañeros y algunos animales. No había acuerdo, sin embargo, sobre la causa. Pero la simple omisión de tales efectos bastaba para poner en duda que se hubiese alcanzado la cima.

En las últimas décadas del siglo XIX, dos médicos consiguieron aclarar la relación existente entre el aire enrarecido y el mal de altura: Paul Bert y Angelo Mosso. El primero realizó estudios a altitudes simuladas en una cámara de descompresión de hierro, y midió el transporte de oxígeno por la hemoglobina. Tras demostrar que la sangre contenía menos oxígeno a cierta altura que al nivel del mar, se expuso a sí mismo a una altitud simulada de unos 6400 metros, al tiempo que respiraba el oxígeno de una bolsa de cuero. Al no experimentar síntoma alguno, concluyó que el mal de altura lo provocaba la falta de oxígeno, y no la baja presión.

Mosso investigó el comportamiento de varias personas en la cota de 4634 metros (la cima del Monte Rosa), y en una cámara de descompresión. Llegó también a la conclusión de que la hipoxia producía mal de altura, si bien sostuvo que todavía era más importante la falta de dióxido de carbono resultante de la hiperventilación.

Los imperativos de la aviación durante las dos guerras mundiales y el creciente interés por los deportes de montaña generalizaron el conocimiento de la hipoxia. Se demostró la existencia de distintas formas de mal de altura, unas de efectos desagradables, aunque pasajeros, y otras más graves y potencialmente letales, cuyos síntomas dependían de qué partes del cuerpo fueran las más sensibles.

El cerebro humano es extremadamente vulnerable. Recibe, por término medio, del 10 al 15 por ciento del gasto cardíaco y utiliza del 15 al 20 por ciento del oxígeno consumido por el cuerpo. La corteza cerebral, donde se desarrolla la actividad mental más compleja, es también la región que mayor consumo exige; no debe, pues, sorprender que la hipoxia afecte en primer lugar a los centros superiores del cerebro, donde reside la capacidad de juicio. En realidad, los efectos de la hipoxia se asemejan a los del alcohol.

El dolor de cabeza constituye el síntoma más ostensible del mal de altura, pero su etiología todavía no está clara. Puede encontrarse explicación en la respuesta de la piamadre, una membrana sensible que cubre el tejido cerebral y los vasos sanguíneos; al descender los niveles arteriales de oxígeno, aumenta la afluencia de sangre al cerebro y, en consecuencia, los vasos distendidos o el tejido cerebral inflamado pueden presionar las membranas protectoras y producir dolor de cabeza. Al mismo tiempo, la falta de oxígeno estimula un aumento de la respiración, que bombea dióxido de carbono de los pulmones y la sangre; esta caída de dióxido de carbono causa, a su vez, un menor aflujo de sangre al cerebro.

El que aumente o disminuya el flujo sanguíneo al cerebro dependerá del equilibrio entre hipoxia e hipocapnia (bajo nivel de dióxido de carbono) y de la sensibilidad de los receptores que gobiernan dicho flujo. Esta sensibilidad varía de un individuo a otro, lo que explica quizá por qué difieren tanto las descripciones de la intensidad del dolor de cabeza y por qué los estudios sobre el flujo cerebral en altitud arrojan a menudo resultados contradictorios. Las náuseas, los vómitos y la perturbación del sueño, tan frecuentes en el mal de altura, pueden responder a una alteración del flujo sanguíneo hasta el mesencéfalo, donde se controlan estas funciones.

El oído, el olfato y el gusto no son afectados por la altura, pero el apetito generalmente disminuye, lo que acaba produciendo pérdida de peso. No está claro si esta pérdida se debe a una mala absorción, o simplemente a una menor ingesta calórica.

Los efectos de la hipoxia son múltiples. Signos y síntomas difieren en función de la altitud alcanzada, la velocidad del ascenso y otros factores. Lo que en principio parece un padecimiento algo desagradable, si bien leve, en poco tiempo puede tornarse en otro de riesgo mortal. No es raro, por ejemplo, que un visitante de un centro turístico de montaña sienta dolor de cabeza y malestar general, y poco después sufra dificultad respiratoria y tos. Tales trastornos pueden terminar en coma o alucinaciones, e incluso en la muerte, si no se tratan adecuadamente.

Aunque los síntomas descritos formen un todo continuo, por comodidad los trataré como entidades separadas. La forma habitual en que se presenta la enfermedad es el mal de altura agudo, que afecta a una cuarta parte de los visitantes de estaciones de montaña. Suele manifestarse por los síntomas descritos: dolor de cabeza, náuseas, vómitos, anorexia y astenia; aunque casi nunca fatal, puede adquirir caracteres de gravedad.

La afección que sufría mi paciente de Aspen, el edema pulmonar de altura, es menos frecuente que el mal de altura agudo pero más peligroso. Ciertos estudios han demostrado que la mayoría de las personas que su-

y conocimiento del mal de altura

Montañeros en el Himalaya y los Andes notan la aclimatación.

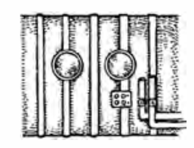
1885 –1995



Expedición científica al Pikes Peak, Colorado.

1911

Estudio de descompresión en cámara en la Operación Everest.



1946

Monte Everest

Ascensión del Annapurna (8091 m) en Nepal.

1950

Ascensión del Everest (8848 m).

1953

La expedición de Silver Hut al Himalaya estudia la aclimatación.

1961

ben a picos incluso moderados, de unos 2400 metros, acumulan algo de fluido en el tejido que separa los alvéolos de los capilares sanguíneos, fluido que suele resorberse prontamente.

Sin embargo, si este fluido se acumula en el interior de los alvéolos, se entorpece el paso de oxígeno del pulmón a la sangre, con lo cual la hipoxia empeorará y se alojará más fluido en los alvéolos. La víctima llegará literalmente a ahogarse en sus propias secreciones, manifestando una progresiva dificultad respiratoria y una tos irritativa que produce un esputo espumoso y sanguinolento.

Todavía más grave que el edema pulmonar es el edema cerebral de altura. En esta forma de la enfermedad, que puede presentarse ya a los 2700 metros, se resiente el sistema nervioso central: hay partes del cerebro que se encharcan. Entre las primeras señales de aviso figura la ataxia, manifestada por el andar vacilante típico de un beodo o por la dificultad en realizar actividades motoras finas; estos trastornos se atribuyen al hinchamiento del cerebelo, área del cerebro que controla el equilibrio. La confusión mental y las alucinaciones son, asimismo, frecuentes. Si no recibe tratamiento, el edema cerebral puede ser mortal.

En el extremo de este continuo fisiológico se encuentra el mal de altura crónico, problema de escasa incidencia que padecen algunas personas cuya vida transcurre permanentemente por encima de los 3700 metros. Los afectados sufren fatiga, palpitaciones, dolor en el tórax e hinchazón de los tobillos, y adquieren un número excesivo de hematíes y coágulos en las venas y pulmones. El descenso a menor altitud corrige esta afección, a menudo fatal.

Por encima de los 3000 metros puede también haber deterioros en la visión. Al no ser fácil obtener la gran aportación de oxígeno que requieren los bastones de la retina, la visión con luz tenue se reduce en un 50 por ciento. Además, a algo más de 4000 metros pueden surgir pequeños puntos sangrantes en la parte posterior de los ojos, hemorragias retinianas que suelen pasar inadvertidas. No se ha podido determinar si estas hemorragias tienen importancia pronóstica o diagnóstica, si bien creen algunos que reflejan hemorragias en otras partes del cuerpo, lo cual gusta muy poco a los montañeros. Quienes afirman que la exposición repetida o prolongada a una fuerte hipoxia puede producir daños cerebrales permanentes, atribuyen éstos a hemorragias similares en el cerebro.

A medida que el cuerpo responde a la hipoxia se suceden cambios complejos y aparentemente contradictorios. La profundidad y la frecuencia de la respiración aumentan, con lo que entra aire a fondo en los pulmones, sube la presión de oxígeno alveolar y se reducen los niveles sanguíneos de dióxido de carbono. Esta respuesta, sin embargo, produce una crisis. Por un lado, debe recurrirse a la hiperventilación para aliviar la hipoxia. Por otro, también es preciso mantener el *p*H del cuerpo. Ahora bien, como este equilibrio se consigue conservando cierta concentración de dióxido de carbono, la hiperventilación amenaza la homeostasis.

Ante este dilema, el cuerpo busca un compromiso: incrementa la respiración lo suficiente para elevar el oxígeno alveolar y excreta bicarbonato para contrarrestar la alcalosis creada por los menguantes niveles de dióxido de carbono en la sangre. El éxito en el equilibrio de estas dos exigencias antagónicas determina la eficacia de la aclimatación, y si el individuo sufrirá o no el mal de altura.

Este doble control de la respiración causa un fenómeno interesante: una fluctuación irregular a medida que el control se transfiere entre los centros del mesencéfalo que responden al dióxido de carbono y al *p*H de la sangre, y los cuerpos carotídeos, pequeños grupos de células situados en el cuello que son sensibles al oxígeno. El resultado es el tipo de respiración errática que se denomina periódica o de Cheyne-Stokes, común por encima de los 3000 metros y universal a altitudes mayores. A un período de respiración rápida, cada vez más profunda, le siguen respiraciones cada vez más superficiales hasta que la función se detiene durante un tiempo alarmante (de ocho a diez segundos), para luego repetirse el ciclo. La respiración periódica es más pronunciada durante el sueño, y por ello la oxigenación media disminuye cuando se duerme.

Otra respuesta precoz a la hipoxia es el aumento de la frecuencia y el gasto cardíacos, lo que impulsa más sangre oxigenada por el torrente circulatorio. Al mismo tiempo, se produce un desplazamiento transitorio de fluido desde la sangre hacia los tejidos, concentrando la hemoglobina y permitiendo así al corazón entregar más oxígeno en cada bombeo. El incremento del gasto cardíaco desaparece en una semana, pero el aumento de ventilación persiste en la mayoría de los casos durante toda la estancia en altitud.

La producción de hematíes se ve estimulada por un aumento inmediato de la eritropoyetina, hormona que actúa sobre la médula ósea. Concurren otros cambios, primarios o secundarios, en numerosos sistemas hormonales y en la actividad del sistema nervioso simpático. Apenas hay duda de que la hipoxia perturba también el equilibrio hídrico y electrolítico; provoca vasoconstricción, retención de agua y cambios en la permeabilidad de las membranas celulares, así como una alteración de la función renal.

Aunque comprendemos la razón de muchos cambios que experimenta el organismo en su respuesta al descenso de la concentración de oxígeno, quedan interrogantes por despejar, sobre todo, en el dominio celular. No conocemos todavía la fisiopatología precisa de la hipoxia. Para cierta teoría, la hipoxia causa una interrupción reversible en la función de un

canal iónico, llamado bomba de sodio, que necesita mucha energía para trabajar. Esta bomba mantiene niveles normales de sodio y potasio dentro de cada célula, y dado que aquélla utiliza hasta un 20 por ciento del total de oxígeno consumido por el cuerpo, no es sorprendente que falle cuando la aportación de oxígeno es escasa.

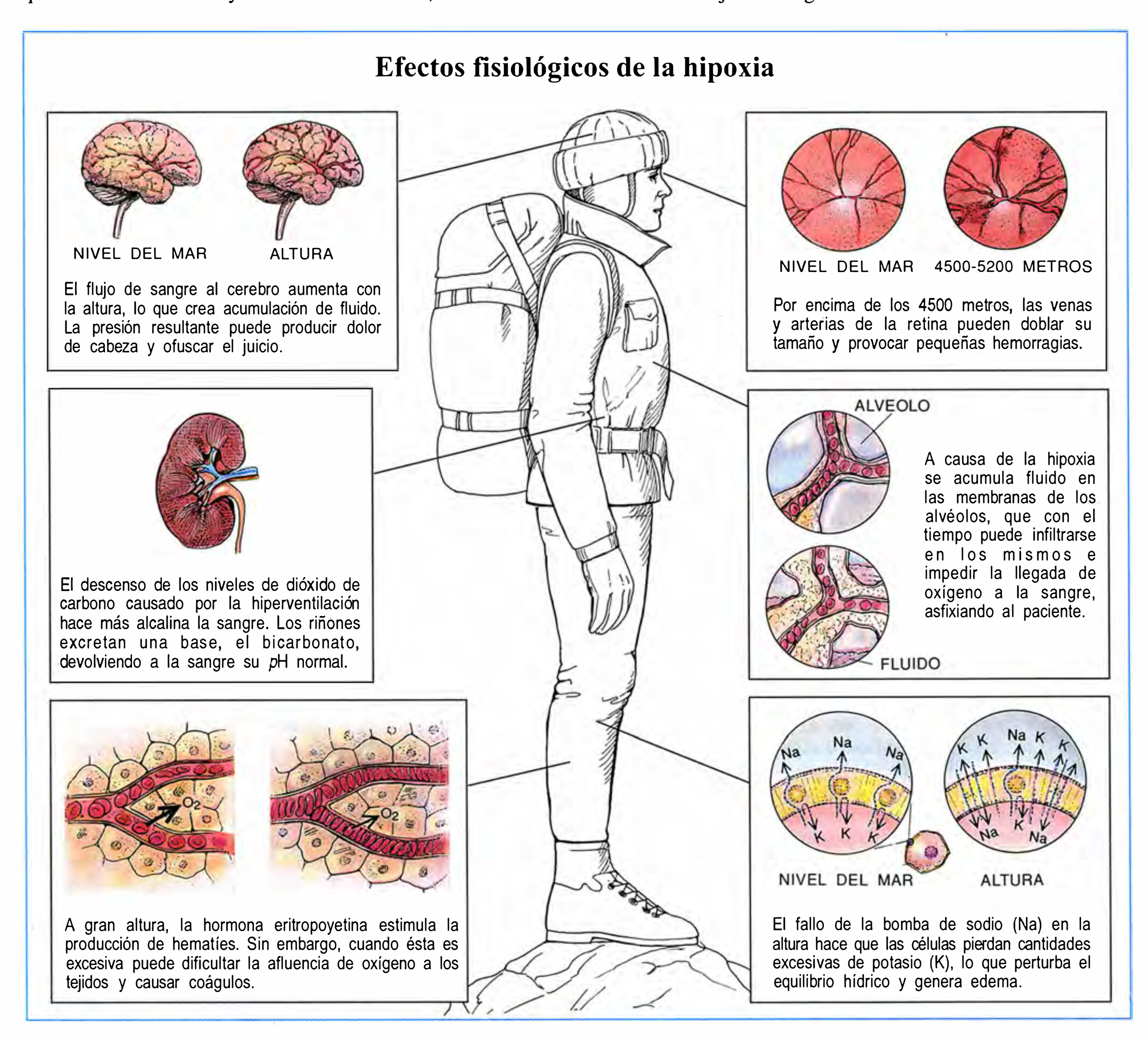
De acuerdo con ese modelo explicativo, cuando el sistema se descompone se acumula sodio en el interior celular en tanto que el potasio escapa fuera; ello perturba el equilibrio hídrico y produce un edema. Las células en que el bombeo falla más aparatosamente son las más afectadas por la hipoxia, y a su vez este fallo influye sobre la forma de mal de altura que se desarrolla. Los estudios recientes revelan que la hipoxia altera los canales del calcio, y puede ser que también contribuyan al mal de altura las disfunciones en otros sistemas de bombeo iónico.

Por razones que ignoramos, la hipoxia parece aumentar la contractilidad de las pequeñas arterias de los pulmones. Esta resistencia causa un aumento de la presión arterial pulmonar; en consecuencia, los vasos sufren distensión, se estira el revestimiento endotelial y se liberan icosanoides o kininas, sustancias biológicamente activas. Algunos icosanoides aumentan la permeabilidad vascular y la agregación plaquetaria, mientras que otros amortiguan esos mismos efectos. La intensidad de la respuesta determina si aparece o no edema pulmonar.

Se supone también que el aumento de presión en las arterias pulmonares estira e incluso rompe las prietas uniones entre células endoteliales. Junto con la acción de los icosanoides, las uniones ensanchadas dejan que plasma y células sanguíneas huyan hacia los espacios intersticial y alveolar. Esta cadena de acontecimientos podría explicar por qué el edema pulmonar de altura difiere tanto del edema causado por sustancias tóxicas, insuficiencia cardíaca o lesión; en estos casos, se dañan las membranas de capilares y los alvéolos, pero no aumenta la presión arterial pulmonar.

A diferencia de los cambios celulares que acompañan al edema pulmonar de altura, los mecanismos que subyacen al edema cerebral se nos escapan. Las tomografías cerebrales han revelado tanto inflamaciones generales como locales, sin que ello aporte ninguna pista para relacionar la patología con los síntomas. Las autopsias han demostrado la existencia de edema generalizado, pequeñas hemorragias dispersas y grandes coágulos.

Efectos fisiológicos de la hipoxia



El flujo de sangre al cerebro aumenta con la altura, lo que crea acumulación de fluido. La presión resultante puede producir dolor de cabeza y ofuscar el juicio.

Por encima de los 4500 metros, las venas y arterias de la retina pueden doblar su tamaño y provocar pequeñas hemorragias.

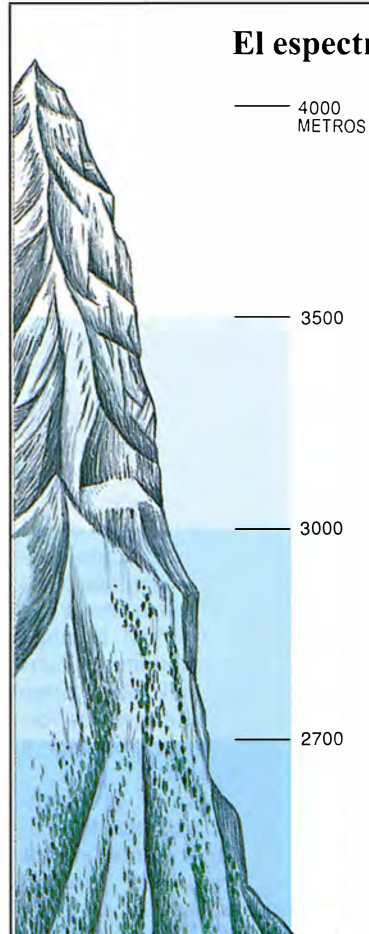
El descenso de los niveles de dióxido de carbono causado por la hiperventilación hace más alcalina la sangre. Los riñones excretan una base, el bicarbonato, devolviendo a la sangre su *p*H normal.

A causa de la hipoxia se acumula fluido en las membranas de los alvéolos, que con el tiempo puede infiltrarse en los mismos e impedir la llegada de oxígeno a la sangre, asfixiando al paciente.

A gran altura, la hormona eritropoyetina estimula la producción de hematíes. Sin embargo, cuando ésta es excesiva puede dificultar la afluencia de oxígeno a los tejidos y causar coágulos.

El fallo de la bomba de sodio (Na) en la altura hace que las células pierdan cantidades excesivas de potasio (K), lo que perturba el equilibrio hídrico y genera edema.

El espectro del mal de altura



El mal de altura crónico afecta a personas que pierden su tolerancia a la gran altitud o que no se aclimatan. Se caracteriza por fatiga y dolor torácico, aumento del número de hematíes y, a veces, insu iciencia cardíaca. Puede aliviarse descendiendo al nivel del mar.

El edema cerebral de gran altura puede producirse a los 2700 metros, pero es más común por encima de los 3000. Se caracteriza por confusión mental, alucinaciones y tambaleos en la marcha; a menudo se desarrolla en las 36 horas siguientes a la llegada a grandes altitudes.

El edema pulmonar de gran altura ocurre generalmente por encima de los 2700 metros, aunque haya personas afectadas a menores altitudes. Los síntomas —cortedad de aliento, tos fuerte, esputo sanguinolento, dolor de cabeza, aletargamiento y fiebre ligera— suelen aparecer al cabo de 36 o 72 horas.

El mal de montaña agudo ataca del 15 al 17 por ciento de quienes suben demasiado aprisa hasta alturas superiores a los 2500 metros. Se caracteriza por dolor de cabeza, fatiga, cortedad de aliento, perturbación del sueño y, a veces, náuseas. La enfermedad raramente requiere más tratamiento que el descenso.

Los habitantes de los altiplanos que contraen el mal de altura crónico tienen una respuesta ventilatoria mermada por la escasez de oxígeno, y por ello están más hipóxicos. Además, parece que la eritropoyetina trabaja más de la cuenta, lo que produce una excesiva proliferación de hematíes. Unida a la exagerada hipoxia, esta mayor masa de hematíes refuerza la viscosidad de la sangre y puede ocasionar una insuficiencia cardíaca congestiva.

Si a los que viven al nivel del mar puede afectarles tan gravemente el ascenso a grandes alturas, ¿cómo es posible que algunos escaladores asciendan y permanezcan a 6000 metros de altitud, e incluso alcancen por corto tiempo la cumbre del monte Everest (a 8848 metros), donde la presión atmosférica no es ni la tercera parte de la registrada a nivel del mar? ¿Cómo pueden sobrevivir los tibetanos en el altiplano de Asia Central o los quechuas morar en los altos Andes? La respuesta la da la aclimatación: los cambios integrados en las funciones del organismo restablecen valores típicos del nivel del mar en la oxigenación de los tejidos.

No es fácil estudiar directamente el proceso de aclimatación en los escaladores o en los moradores de los altiplanos; numerosos factores como el frío y el cansancio, los alimentos y el agua inadecuados, así como las duras condiciones de vida, pueden falsear los resultados. La mejor manera de aislar los efectos de la hipoxia es encerrar en una cámara de descompresión a los sujetos observados, aunque el experimento produzca sus propias tensiones, confinamiento, aburrimiento y falta de ejercicio, que podrían enmascarar las observaciones.

En 1946, acometí con Richard L. Riley, del Hospital Bellevue, la Operación Everest, experimento durante el cual cuatro hombres permanecieron 35 días en una pequeña cámara de acero que fue descomprimida gradualmente hasta alcanzar una presión equivalente a la de la cumbre del Everest. Nos sirvió para demostrar que los hombres podían sobrevivir allí, e incluso efectuar trabajos ligeros después de pasar 10 días en un ambiente equivalente a la estancia a 7600 metros. (El experimento tuvo lugar siete años antes de ascender al Everest utilizando oxígeno, y 32 años antes de la primera ascensión sin asistencia de oxígeno.)

En 1985, un equipo de científicos repitió el experimento en la Operación Everest II. Ocho hombres vivieron durante 40 días en la cámara, y seis de ellos "subieron a la cumbre" repetidamente tras permanecer 10 días en condiciones equivalentes a 7300 y 7600 metros de altitud. A partir de éste y algunos otros estudios, conocemos mejor, aunque no del todo, la aclimatación. Confiamos en que las lecciones aprendidas de las grandes altitudes sean valiosas para el diagnóstico y tratamiento de pacientes hipóxicos por enfermedad o lesión, que residan a nivel del mar.

Como anteriormente se ha descrito, el cuerpo humano responde a la altitud esforzándose en mantener un suministro casi normal de oxígeno a las células. Estas respuestas de emergencia —aumento de la intensidad respiratoria y del ritmo cardíaco— protegen el organismo mientras se van produciendo cambios más duraderos. El esfuerzo de respiración continúa siendo la reacción más potente. Se forma además nueva hemoglobina y aumenta el número de hematíes. En condiciones normales están inactivos del 20 al 30 por ciento de los capilares del cuerpo, mientras que, en altitud, estos vasos diminutos colaboran a asegurar el riego sanguíneo de los tejidos. El metabolismo anaerobio se ve potenciado por cambios enzimáticos en el interior de las células.

Aunque el organismo puede compensar parcialmente el descenso de los niveles de oxígeno, muchas actividades quedan alteradas. Se ha demostrado que, por cada incremento de altura de 300 metros, la capacidad de trabajo se reduce en un tres por ciento. Un largo período de residencia no puede recuperar del todo la capacidad de trabajo que se disfruta a nivel del mar.

Los descendientes de poblaciones que han vivido a gran altitud por muchas generaciones presentan cambios más permanentes, probablemente de índole genética, respecto a los que habitan a nivel del mar. Algunos nativos poseen pulmones mayores en un tórax en tonel; otros tienen valores de hemoglobina notablemente superiores. Entre los quechuas de Chile, las mitocondrias (diminutas factorías que suministran energía a las células) son más numerosas o mayores, o su distribución es diferente.

Pese a siglos enteros de residencia, los humanos nunca se han adaptado a vivir permanentemente a altitudes mayores de unos 5000 metros. Los que habitan a nivel del mar resisten sólo una estancia de unos meses a esa altura, hasta que el deterioro sobrepasa la aclimatación. Con el tiempo, el individuo pierde peso, se torna abúlico y se debilitan todas las funciones vitales.

Los estudios realizados sobre animales descubren habilidades sorprendentes en la forma de transportar y consumir el oxígeno. Focas y ballenas, maestras en la inmersión, tienen bazos muy grandes que les sirven de depósito de donde extraer sangre oxigenada. Igual que en el hombre, su principal adaptación consiste en desviar flujo sanguíneo de los órganos menos importantes a los esenciales; a diferencia del hombre, llegan a suspender enteramente ciertas funciones. Otros animales, como yaks y llamas, utilizan diferentes formas de hemoglobina para obtener y almacenar más oxígeno.

El montañero halla, en la ascensión lenta, la mejor garantía de aclimatación. Los impacientes corren riesgos de convertirse en "pacientes". No debiera ascenderse, en principio, más de 600 metros por día cuando se está a más de 2000 metros, y subir a un paso tolerado por el miembro más vulnerable del grupo. Si aparecen síntomas importantes, hay que tomar un día de descanso, o incluso descender unos cientos de metros por la noche, pues tiene mayor influjo la altitud a la que se duerme que la altitud alcanzada durante el día. También resulta necesario beber más agua en altitud que a nivel del mar, para compensar el fluido perdido por hiperventilación. Durante el primer par de días conviene no realizar ejercicios intensos; evítese, asimismo, la ingestión de sal por encima de lo normal, que tiende a causar retención de agua, quizás en grado suficiente para provocar el mal de altura.

Quienes deseen un remedio rápido pueden tomar ciertos medicamentos. La acetazolamida inhibe la secreción de anhidrasa carbónica, para así facilitar una respiración más profunda o más rápida sin excesiva pérdida de dióxido de carbono; el fármaco inhibe, además, la acción de las hormonas antidiuréticas. La dexametasona, un glucocorticoide, es eficaz en parte por la euforia que causa, aunque a veces puede producir graves efectos secundarios, incluso episodios de psicosis. La nifepidina, bloqueador del canal de calcio y vasodilatador general, disminuye la presión arterial pulmonar. Su forma de acción prolongada puede proteger a los montañeros que sean especialmente sensibles al edema pulmonar de altura.

Por lo que se refiere a otros tratamientos, las formas leves de la enfermedad suelen desaparecer en unos pocos días. Si se sospecha la presencia de formas más graves, como el edema pulmonar o cerebral, no hay mejor remedio que el descenso: una bajada de 1000 metros aportará un rápido alivio; si no fuera así, habría que sospechar la existencia de alguna otra enfermedad. La respiración de oxígeno asistida es útil, pero en una montaña donde el suministro es limitado, y en casos graves de edema, el oxígeno no debería retrasar el descenso: bajar es siempre la solución indicada. Cuando el descenso es imposible, puede utilizarse un diurético fuerte o morfina. Un tratamiento reciente y prometedor consiste en encerrar al paciente en una bolsa que pueda inflarse a una presión equivalente a altitudes mucho menores.

Según sugiere el reconocimiento, bastante reciente, del edema pulmonar de altura, nos queda mucho que aprender sobre el mal de montaña. El progreso del futuro determinará que el deporte del alpinismo se torne más seguro y placentero, si los excursionistas se atienen a unas reglas sencillas. Sin olvidar los beneficios que reportará la investigación de la hipoxia para el tratamiento de afecciones no relacionadas con la altura, tales como el enfisema, el asma y la neumonía.

Pese a todo, como demuestran los estudios sobre aclimatación y deterioro final, está claro que existen ciertos límites fisiológicos. Quizá convenga mantener las más altas cumbres fuera de nuestro alcance, ejerciendo su profunda atracción y perpetuo desafío.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIGH ALTITUDE PHYSIOLOGY. Dirigido por John W. West. Van Nostrand Reinhold, 1981.

THE MONGOLFIER BROTHERS AND THE INVENTION OF AVIATION, 1783-1784. Charles S. Gillespie. Princeton University Press, 1983.

GOING HIGHER: THE HISTORY OF MAN AND ALTITUDE. Charles S. Houston. Little, Brown and Company, 1987.

HIGH ALTITUDE MEDICINE AND PHYSIOLOGY. Michael P. Ward, James S. Milledge y John B. West, University of Pennsylvania Press, 1989.

John Horgan

HANS A. BETHE: *el brillo de las estrellas*

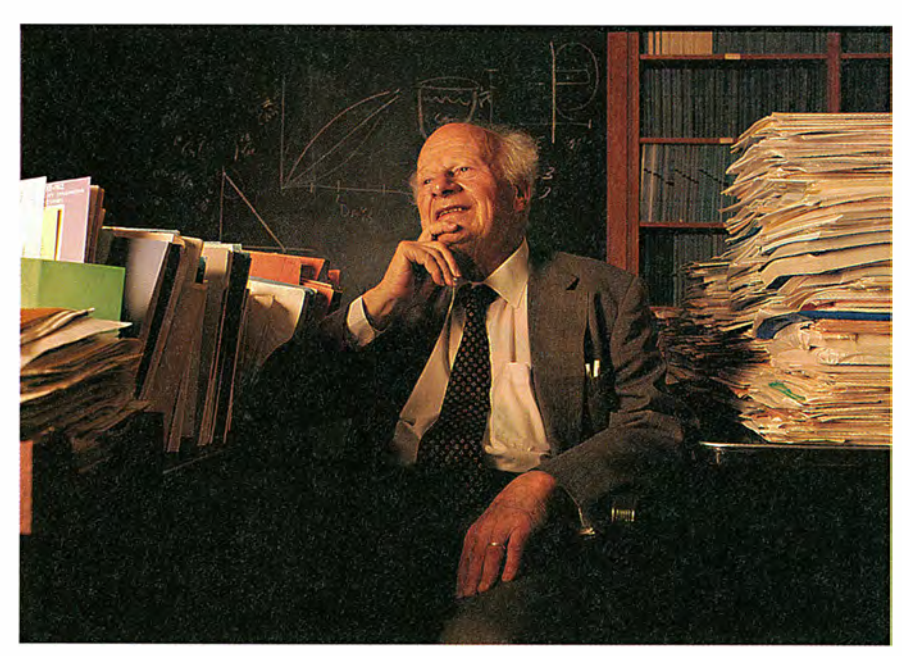
Sus movimientos son pausados, quizás atenazado por la enfermedad muscular degenerativa que padece desde hace diez años. Pero, de complexión fornida, echado para adelante como un montañero empedernido, rezuma todavía poder y gravedad. Bethe habla despacio, claro y preciso. Su voz, con un ligero acento alemán a pesar de que llegó a la Universidad de Cornell hace casi 60 años, es profunda y resonante. Rememorando su vida académica no se muestra ni modesto ni petulante. Se limita a describir las cosas tal como las ve.

Avanzada la entrevista, no puedo resistir y le hago la pregunta sobada y embarazosa a un tiempo. "¿Cuál considera su... su...?" "¿Mayor logro?", dice Bethe echándome una mano. Asiento. Debería ser su teoría de la energía estelar, que desarrolló en 1938 y que le valió el premio Nobel en 1967. Pero considera que realmente su mejor artículo es el que escribió en 1930 y que trata de cómo los electrones imparten energía a los átomos. "Es un poco triste admitir que nada posterior fue mejor", añade.

Otro tópico: "¿Son los físicos atletas que dan lo mejor de sí mismos en la juventud?" Bethe, que tiene 86 años, no exterioriza ningún enfado ante la impertinencia. Una fugaz sonrisa cruza por su tez morena. "No, de ninguna manera. Pienso que soy todavía bastante bueno." Mientras conversamos, su secretaria está mecanografiando un artículo en el cual presenta un nuevo método —y Bethe cree que mejor— para calcular cómo las estrellas estallan en forma de supernovas.

Para un físico, tal longevidad no es algo corriente, según el parecer de John N. Bahcall, un astrofísico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y antiguo colaborador suyo. "Me costaría mucho pensar en algún otro que haya contribuido de manera significativa a la física teórica pasados los 50", dice Bahcall. Bethe se encoge de hombros. "No hay nada tan interesante como la ciencia", repone. "Mientras me dure el cerebro, eso es lo que voy a hacer".

Si hubiera un científico al que se le perdonaría dormirse en su gloria, sería a Bethe. Comenzó en 1920, empuñando la mecánica cuántica a modo de láser, iluminando fenómenos que van desde las partículas elementales hasta las estrellas, pasando por conjuntos densos de núcleos atómicos. Tuvo un protagonismo destacado en el diseño de la primera bomba atómica durante la segunda guerra mundial, y abogó después por el uso de la energía nuclear, causa en la que todavía cree. "Ahora es más necesaria que nunca debido al calentamiento global".



HANS A. BEHTE, que dirigió la división teórica del Proyecto Manhattan, se convirtió después en fogoso abogado del control de armas nucleares. Foto: Robert Prochnow.

Tenaz defensor del control de las armas nucleares, promovió la suspensión de pruebas atómicas atmosféricas en 1963 y los sistemas de defensa contra misiles balísticos en 1972. Más cerca, en 1991, firmaba un escrito junto con Kurt Gottfried, físico de Cornell, y Robert S. McNamara, el que fuera secretario de defensa, en el que se urgía a los Estados Unidos y a la Unión Soviética a reducir sus arsenales nucleares a 1000 cabezas cada uno. (Con los recortes aprobados, cada parte retendrá todavía unas 5000 cabezas.)

Nacido y criado en Estrasburgo, Bethe estudió con algunos de los padres fundadores de la mecánica cuántica, entre ellos con Enrico Fermi en Roma y con Niels Bohr en Copenhague, antes de emigrar a los Estados Unidos en 1935. (Aunque educado en la fe protestante de su padre, Bethe había perdido su cargo universitario en la Alemania nazi porque su madre era judía.) Asentó muy pronto su reputación con tres ensayos en los que pasaba revista a lo que se sabía de física nuclear y lo que faltaba por conocer. Esas publicaciones, la llamada "biblia de Bethe", canalizaron la labor investigadora de toda una generación de físicos.

La intuición acerca del brillo estelar, que le valió el premio Nobel, le vino "casi por accidente", comenta. En 1938 Teller, un emigrante húngaro que estaba organizando una conferencia de astrofísica, le invitó a presentar una comunicación. "Le objeté al principio que por qué había de escribir sobre astrofísica, cuando había otros muchísimos problemas más apremiantes. En particular yo estaba entonces interesado por resol-

ver cierta aporía cuántica, la de que la carga eléctrica debe causar en el electrón una energía infinita.”

Teller, que era uno de los amigos más íntimos de Bethe, le insistió hasta persuadirle. Y éste acotó uno de los problemas críticos de la astrofísica. Aunque otros expertos se afanaban por mostrar de qué modo la fusión nuclear de las estrellas producía elementos pesados, el hilo seguido por él fue “olvidarse de eso por ahora y concentrarse en cómo se consigue la energía”. Acabó por probar que casi toda la energía generada por las estrellas más brillantes procedía de una reacción de fusión, con el hidrógeno de combustible y el carbono de catalizador. “Así es como inventé el ciclo del carbono o tal vez lo ‘descubrí’, por mejor decir”.

Declarada la segunda guerra mundial, Teller y otros le convencieron para que se integrara en una nueva empresa: la construcción de una bomba nuclear de fisión. A instancias de J. Robert Oppenheimer, jefe científico del Proyecto Manhattan, Bethe se trasladó a Los Alamos para hacerse cargo de la división teórica. Era un grupo de lumbreras de la talla del malogrado Richard P. Feynman, doce años más joven que Bethe.

Recordando esos días, Feynman comparó a Bethe con un navío de guerra que, escoltado por buques más pequeños, esto es, los físicos más jóvenes, se adentraba “majestuosamente” en lo desconocido. La admiración era mutua: Bethe responde que el matemático húngaro John von Neumann era probablemente el físico más brillante que había conocido, y Bohr el mayor, en términos de logros sumados, pero Dick Feynman “combinaba la brillantez con la grandeza”.

Se manifiesta reticente a explicar cuál fue su parte en disipar los temores de que la primera bomba atómica pudiera iniciar una deflagración global. La cuestión se ha exagerado mucho. Relata con sumaria brevedad lo ocurrido. En 1942 Teller había supuesto que el calor del estallido nuclear podría desencadenar la fusión incontrolada del nitrógeno atmosférico y prender el planeta. Oppenheimer y otros se lo tomaron bastante en serio; él se acodó sobre la mesa y, tras el estudio del problema, concluyó que se trataba de una hipótesis increíble por improbable.

Más tarde, los cálculos de otros físicos de Los Alamos corroboraron la conclusión de Bethe y “zanjaron la cuestión”. Justo antes de Trinity, la primera prueba de la bomba atómica, Fermi preguntó jocosamente si alguien quería apostarse algo a que la explosión incendiaría el mundo entero. ¿No estaba preocupado durante la cuenta atrás de que pudiera desencadenarse un cataclismo? “No”, replica. Su única preocupación era que el cebador, que él había diseñado, no funcionara. Funcionó.

Durante la guerra fría, se opuso al desarrollo de la bomba de fusión, de una potencia enormemente superior, también llamada bomba de hidrógeno o simplemente “la súper”. Aunque creía que las armas basadas en la fisión eran necesarias para contrarrestar la agresión soviética, le parecía que los Estados Unidos, renunciando a la súper, podrían haber convencido a la Unión Soviética de lo mismo. Ahora no está seguro, tras la publicación de las memorias de Andrei Sakharov, en las que revela que los soviéticos “estaban determinados a construir una independientemente de lo que nosotros hiciéramos”.

La ambigüedad de Bethe ante la súper minó su relación con Teller, el más entusiasta defensor de la bomba. Alejaron aún más sus posturas en 1954, tras la declaración de Teller ante un comité nombrado por la Comisión de Energía Atómica para determinar si Oppenheimer —que compartía las reticencias de Bethe frente a la súper— era un riesgo para la seguridad. Teller ofreció “un testimonio muy retorcido”, dice Bethe, “pero quedó claro que estaba en contra de Oppenheimer”.

Las preocupaciones políticas nunca le han apartado de su primer amor, la física. A finales de los cuarenta sugirió una manera de eliminar la predicción imposible de la energía infinita que se derivaba de la descripción del electrón a partir de la mecánica cuántica. Siguiendo las ideas de Bethe, varios físicos más jóvenes, entre los que destaca Feynman, que se fue con él de Los Alamos a la Universidad de Cornell, al acabar la segunda guerra mundial, desarrollaron la electrodinámica cuántica, una teoría muy lograda para todos los efectos electromagnéticos.

En los decenios cincuenta y sesenta, ideó poderosas técnicas para calcular las propiedades de aglomeraciones densas de neutrones y protones, también conocidos como materia nuclear. El tema todavía le fascina. De hecho, hace tres años él mismo “se hizo aprendiz” de otro físico, Gerald E. Brown, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, para aprender teoría de aforo en la red. La teoría, que predice cómo se transforma la materia nuclear en un plasma de quarks y gluones a temperaturas extremadamente altas, es una de las más complicadas y desafiantes de la física. “Me interesa vivamente aprender cosas nuevas”, confiesa con brillo en los ojos.

Desde que quedó libre de sus cargas docentes en 1975, ha dedicado la mayor parte de sus energías al tema que tiempo atrás le espoleara: las estrellas. En los últimos años, ha escrito tres artículos con Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados, tratando de explicar por qué el Sol despide menos neutrinos de los que predice la física actual. Bahcall y Bethe han sido los adalides de la teoría Mikheyev—Smirnov—Wolfenstein (así denominada en honor de sus iniciadores), en virtud de la cual ciertos neutrinos solares se transforman antes de alcanzar la Tierra en variantes más difíciles de detectar.

Se ha esforzado también por dar una explicación del mecanismo de explosión estelar. Un escollo poco conocido de la astrofísica es que —a pesar de los enormes avances en la observación, la teoría y la tecnología de los ordenadores— las últimas simulaciones en ordenador de supernovas o resultan en explosiones muy débiles o no reproducen la explosión. Bethe ha bregado con el problema durante 14 años. Cree que tiene ya la solución.

Su propuesta aboga por una simplificación de los modelos actuales de supernova, al menos de dos maneras. Más que calcular la producción de neutrinos de principio a fin, ha intercalado un número deducido de las observaciones de la supernova gigante de 1987. También emplea un método más eficiente para calcular la energía neta generada en una supernova por dos reacciones nucleares que compiten y en las que intervienen, respectivamente, electrones y neutrinos. Estas simplificaciones proporcionan un modelo que explota como es debido; y es a la vez tan directo que sus resultados se pueden calcular sin ordenador. “Puedo hacerlo todo algebraicamente”, subraya. “Eso me hace muy feliz”.

Aunque llevamos hablando cuatro horas seguidas, le cuesta ocultar su excitación ante la aceptación que pudiera tener su hipótesis. Pone de relieve que aún no ha pasado la revisión de los evaluadores. Su secretaria prepara copias originales para un selecto grupo de expertos. Pero tiene confianza en que será bien aceptada. Es “un artículo bastante bueno”, dice —casi tan bueno, incluso, como su favorito de siempre, el que escribió allá en 1930.

Ciencia y sociedad

La educación primaria en Europa

Tema con variaciones

En la mayoría de los países europeos, la duración de la escolaridad obligatoria es de unos nueve años, con tendencia sostenida en el último cuarto de siglo a crecer paulatinamente, hasta alcanzar en algunos lo que probablemente sea su cota máxima: la mayoría de edad civil.

En 1960, la edad media de los alumnos comunitarios al terminar la escolaridad obligatoria era de 14,1 años; hoy esa media es ya de 15,6 años y es previsible que siga aumentando en el futuro. Hay países, como Bélgica y Alemania, en que alcanza hasta los 18 años, aunque no necesariamente a tiempo completo; es decir, los estudios que deben seguirse hasta esta edad pueden compaginarse con una actividad laboral. En Holanda, por el contrario, el período se amplió en el último decenio por su extremo inferior, incluyendo a los niños de 5 años de edad, lo cual era normativo desde mucho antes en el Reino Unido.

Dentro del período obligatorio, los primeros años, aquellos durante los cuales se aprenden las materias instrumentales, reciben tradicionalmente el nombre de *educación primaria*. Por materias instrumentales se acostumbra entender lo que en inglés corresponde a las tres erres: *Reading, wRiting* and *Reckoning* (leer, escribir y contar). A diferencia de lo que acontece en el nivel inmediatamente superior, la denominada educación secundaria, en la primaria no se introduce entre los alumnos ningún tipo de diferenciación basada en los resultados académicos y, por regla general, las materias son impartidas por un solo docente o, a lo sumo, por un número muy reducido de profesionales cuya cualificación equivale a una diplomatura universitaria y no a una licenciatura, como se exige, por el contrario, a quienes imparten docencia en la educación secundaria. Más modernamente, a medida que el primer ciclo de la educación secundaria se fue universalizando, se introdujo la noción de *educación básica*, dando a entender con ella la necesidad de ampliar el número de años necesario para cubrir con éxito los objetivos asignados a la educación primaria. La educación básica, por tanto, abarca tanto la educación primaria como la secundaria inferior o de primer ciclo (opuesta a la superior o de segundo ciclo, la que conduce al título de *bachiller* y confiere el derecho de acceso a la universidad). Aquí, sin embargo, nos referiremos exclusivamente a la educación primaria.

Existe una gran semejanza entre los planes de estudios en este nivel educativo; escasean, por así decirlo, las sorpresas programáticas y de contenidos. En la imposibilidad de recogerlos y comentarlos todos, hemos procurado sintetizar sus rasgos característicos y las diferencias más notables en la tabla adjunta.

Veamos primero un par de casos especiales. En Alemania no todos los *Länder* conceden los mismos porcentajes a las asignaturas incluidas, aunque sean obligatorias. Las cifras que refleja la tabla son, en concreto, las del Estado de Baja Sajonia, sin que

	LENGUA PROPIA	MATEMATICAS	ESTUDIOS SOCIALES	EDUCACION RELIGIOSA O MORAL	EDUCACION ESTETICA Y ARTISTICA	EDUCACION FISICA	TRABAJO PRACTICO	OTROS
ALEMANIA(*)	20	20	13	9	7	12	9	10
BELGICA(*)	32	28	14	7	11	1	–	–
DINAMARCA	28	16	10	5	12	9	8	3
ESPAÑA	28	16	14	6	20	12	–	4
FRANCIA	33	22	26	–	–	19	–	–
LUXEMBURGO	3	17	11	10	3	3	5	–

Esquematización de los contenidos de los planes de estudio de la escuela primaria en algunos países comunitarios, con indicación porcentual del tiempo dedicado a los distintos grupos. Los datos de Alemania son, en concreto, los del Land de Baja Sajonia, tomados como muestra de los restantes; los de Bélgica se refieren a las escuelas francófonas.

difieran mucho las de los otros Estados, aunque en Hamburgo y en Bremen, por ejemplo, la enseñanza de la religión no constituye materia obligatoria, mientras que sí lo es en el resto, donde los alumnos han de elegir entre las confesiones católica y protestante. La columna de "otros" alude a la existencia de clases suplementarias, es decir, enseñanzas ofrecidas a alumnos (reunidos por lo general en grupos pequeños) que, por una razón u otra, no tienen suficiente con las horas habituales para progresar adecuadamente en determinadas asignaturas. Bajo el rótulo de "trabajo práctico" se recogen actividades que, en buena parte, podrían figurar igualmente bajo "educación artística", pues se trata de "manualidades creativas" y "trabajo creativo con materiales textiles".

El segundo caso especial es Bélgica, que practica una división de sus escuelas en función de la lengua propia de la comunidad, sea ésta francófona o neerlandófona. En el cuadro hemos recogido sólo los porcentajes relativos al sector francoparlante, en el que el horario destinado a lengua propia y a matemáticas es mayor que en el otro. Por el contrario, en el sector neerlandés se introduce en el currículo una segunda lengua extranjera (inglés, por lo general) a partir del tercer año. Los trabajos manuales se incluyen dentro de la "educación artística".

Desde el punto de vista comparativo, puede observarse que las proporciones de tiempo dedicadas a determinadas materias, especialmente a las consideradas instrumentales, son bastante semejantes. Por lo que a la lengua propia se refiere, destaca la importancia que se le asigna en Francia, seguida de Bélgica (de la Bélgica francófona) y, no muy de lejos, por Dinamarca y España. El porcentaje de Alemania es bastante menor, aunque conviene recordar que las "enseñanzas suplementarias" antes aludidas inciden muy a menudo en este ámbito. En cuanto a Luxemburgo, este pequeño país considera, aprende y usa como lenguas oficiales tanto el francés como el alemán, a las que se dedica más del 40 por ciento del tiempo lectivo, mientras que la lengua propia se refiere sólo al dialecto luxemburgués.

No detallamos el aprendizaje de una lengua extranjera porque, a nivel primario, sólo Dinamarca le concede un espacio importante en el plan de estudios. De todos modos, no conviene olvidar que Alemania la incluye en el quinto año, es decir, apenas terminada la *Grundschule* o escuela primaria. En Italia, la introducción de un idioma extranjero fue una de las novedades importantes del plan de estudios de 1985. Y otros países, como Holanda, que se han mostrado más renuentes en este campo, vienen realizando algunas experiencias en la misma dirección.

También es bastante pareja la proporción de tiempo destinada a matemáticas, con excepción del caso belga. Sorprenderá quizá la ausencia de una columna específica destinada a ciencias. La razón es que hay una tendencia arraigada en los países europeos (y no sólo en los de la Comunidad) a la integración de las ciencias fisiconaturales y sociales en unidades de aprendizaje globales, de modo que resulta complicado diferenciar qué porcentajes se dedican a cada una de esas áreas. El único caso de clara separación es el de Dinamarca, país que, por otra parte, opera de un modo bastante tradicional en la conformación de las asignaturas a nivel primario; incluso allí hay un neto predominio de los contenidos de carácter social (historia, geografía, formación política). Algo parecido ocurre en Luxemburgo, donde también se prefiere no fundir los contenidos de enseñanza en grandes unidades, pero la originalidad de algunos de ellos hace difícil situarlos por separado; se trata en concreto de materias tales como "enseñanza intuitiva", "geografía", "historia nacional" y "medio local".

Por lo que se refiere a otros países, el porcentaje recogido en el caso francés corresponde a lo que allí se denominan *activités d'éveil*, en las que se incluyen igualmente las de carácter artístico, trabajos manuales y hasta formación moral; de ahí que, por un lado, no figure porcentaje alguno en las columnas correspondientes a esos conceptos y que, por otro, el porcentaje recogido bajo esta rúbrica sea tan alto. En Alemania, la integración de materias cientificonaturales y sociales se hace mediante un conjunto programático denominado *Sachunterricht*, mientras que en Bélgica es corriente encontrar la expresión de "exploración y conquista del entorno".

La mayoría de los países europeos destina una parte más o menos importante del horario escolar a la enseñanza de la religión, salvo Francia, donde para facilitar que esto pueda hacerse fuera de la escuela se llegó antaño al acuerdo de declarar no lectivos los miércoles. También conviene aclarar que el porcentaje dedicado en España a "educación artística" incluye la realización de trabajos manuales (que no figuran por eso en la casilla correspondiente); y, además, que la ausencia en todos los países de una materia sobre formación política no significa que este contenido no venga asumido por otras áreas, pues suele estar incluido en esa área integrada de ciencias y materias sociales antes aludida.

Ya hemos comentado que "otros", en el caso de Alemania, es el porcentaje destinado a "enseñanza suplementaria". En Dinamarca, corresponde a las disciplinas optativas que pueden organizarse a partir del séptimo curso. Y, por lo que se refiere a España, existe, en teoría, al menos una hora "de libre disposición" dedicada a actividades relacionadas con las peculiaridades del medio.

Pero el cuadro recoge sólo una parte, exactamente la mitad, de los países que componen la Comunidad Europea. Convendrá decir también algo acerca de los que no figuran allí. La no inclusión de Inglaterra es quizá la más clara. Este país ha venido practicando una gran libertad en la elaboración de los planes de estudios, tanto a nivel primario como a niveles superiores. No podrían, pues, señalarse porcentajes concretos de dedicación, aunque en la práctica ha habido y hay un generalizado consenso sobre las materias que han de abordarse e incluso sobre algunos porcentajes mínimos de dedicación a las mismas. Por ejemplo, lengua propia y matemáticas consumen el 50 por ciento o más del tiempo escolar. De todas maneras, la situación está cambiando en profundidad; la *Education Act* de 1988 introdujo por primera vez unos "contenidos mínimos" (*core curriculum*) que han de impartirse obligatoriamente en todas las escuelas.

Más nítido aún es el caso holandés. En este país, según declaran textualmente las propias autoridades, "la enseñanza primaria comprende 11 materias obligatorias y 15 materias optativas. La cantidad de tiempo otorgada a cada una de ellas viene determinada por la autoridad competente y no está sujeta a regulación". Algo parecido podríamos decir de Irlanda, cuyas autoridades educativas declaran expresamente que no desean establecer criterios inamovibles en estos puntos. En Portugal se da por hecho que, en la enseñanza primaria, la distribución del tiempo consagrado a cada materia es responsabilidad de cada maestro. En Grecia, algunos cambios recientes hacen difícil precisar cuál es la situación actual en este punto. En cuanto a Italia, los nuevos programas publicados en 1985 espe-

cifican con detalle los objetivos y los contenidos de todas las materias de enseñanza (lengua italiana, lengua extranjera, matemáticas, ciencias, estudios sociales, religión, educación física o "motórica", etc.), pero sobre horarios y dedicaciones se reconoce que corresponde al maestro, colegiada e individualmente, efectuar con previsiones razonables la programación didáctica, estableciendo las modalidades concretas por medio de las cuales conseguir las metas fijadas. Es muy interesante reparar en la inclusión dentro del plan de estudios de una lengua extranjera, así como materias nuevas o de nueva concepción, como puede ser el caso de "educación a la imagen", o de "educación al sonido y a la música".

En cuanto a las finalidades de esta etapa educativa, ha perdido vigencia el objetivo general de socialización, que predominaba en los años setenta, y se vuelve a considerar que lo esencial es que proporcione un núcleo de conocimientos y aptitudes cognoscitivas básicas e instrumentales. Como esto no constituye preparación suficiente para la vida adulta y la actividad laboral, sobre todo por la rápida evolución tecnológica y las exigencias cambiantes del mercado de trabajo, se procura que los alumnos adquieran aptitudes nuevas y se motiven para mantenerse en un proceso de educación permanente. A partir del nivel secundario, cada niño, según sus preferencias y su capacidad, puede elegir entre una variedad adicional de materias optativas.

Además, se ha dejado de prestar atención exclusiva a las cifras de matrícula para hacer más hincapié en la calidad, la gran preocupación actual. En especial, se procura resolver los problemas del bajo rendimiento, del fracaso escolar y de la deserción, para evitar que los alumnos dejen de asistir a la escuela sin poseer capacidades ni calificaciones apropiadas, mediante la adopción de políticas y métodos destinados a combatirlos y compensarlos. También se manifiesta una tendencia general a intervenir más activa e intensamente en pro de los más desfavorecidos.

Si bien las mayores exigencias formativas derivadas del progreso científico y técnico afectarán principalmente a los niveles superiores, la escolaridad obligatoria deberá adaptarse también. El ejemplo más palmario es la informática: dada la seria desventaja que representa carecer de una "cultura informática" (la capacidad de comprender y producir información mediante el ordenador), su difusión se convertirá en objetivo importante de la escolaridad obligatoria.

(Francesc Pedró, profesor de educación comparada, Universidad Nacional de Educación a Distancia).

Transferecia tecnológica

Un antecedente del XVII

Los jesuitas confiaron ganarse Oriente a través de los conocimientos científicos y técnicos europeos. Se propusieron poner en práctica los principios fundamentales establecidos en *De re metallica* ("Sobre los metales"), de Georg Bauer (1494-1555), en China. Fracasaron. Debióse ello al ocaso de la dinastía Ming y a la férrea oposición de la administración del Estado.

La historia considera el *De re metallica* de Georg Bauer, latinizado en Agricola, como el tratado básico de minería y siderurgia de la Edad Moderna. De su interés da fe su éxito inmediato. Un año después de su primera edición (1556), publicada en latín, en Basilea, apareció su versión alemana. Herbert Hoover, ingeniero de minas que llegaría a la presidencia de los Estados Unidos, la tradujo al inglés en 1912. Menos conocida es su introducción en China, ya en el siglo XVII, y la controversia que originó en la corte.

Los jesuitas desempeñaron un papel sobresaliente en la comunicación y difusión de numerosos tratados científicos y técnicos de Occidente, entre ellos el *De re metallica.* Hemos podido reconstruir su largo camino hacia China. En el ejemplar conservado en la biblioteca de la misión de la Compañía en Pekín, se lee una dedicatoria en latín, donde se explica "que el libro fue entregado por el síndico de Munich Georgius Locher en 1617, o poco después, a Johann Terrenz en obsequio para la misión". Terrenz, que había nacido a orillas del lago Constanza en 1576, viajó con un grupo de jesuitas a Oriente y un lote de 7000 libros que debían constituir la base de la biblioteca católica.

De su traducción al chino se encargaron Li Tianjing, alto funcionario, y el jesuita Johann Adam Schall von Bell, astrónomo nacido en Colonia. Li dirigió de 1634 a 1644 la Oficina Imperial del Calendario, en la que varios jesuitas prestaban su asesoría gracias a sus conocimientos astronómicos. En carta al emperador, fechada el 31 de julio de 1639, Li sugería enviar a las provincias una traducción del *De re metallica* para poner en práctica los métodos que la obra describe y presenta ilustrados. Los beneficios que se extrajeran se dedicarían a sufragar los crecientes gastos militares.

Como se deduce de esa petición al trono, Schall von Bell había iniciado la traducción de los tres primeros capítulos de un total de cuatro en la versión china, auxiliado por dos nativos y supervisado por Li. El manuscrito, entregado con la solicitud, llevaba por título "Kunyu gezhi" ("Inquisiciones exhaustivas sobre lo que contiene la Tierra").

A los cuatro días de recibida la carta, el emperador Chongzhen mandó que se terminara la traducción, si bien él se quedaba con el manuscrito entregado. Un año más tarde, Li realizó una segunda petición al trono en la que daba cuenta del final de la traducción y hacía especial hincapié en el interés del último capítulo; en éste se abordaban los métodos más secretos y complicados de la fundición. De nuevo, el monarca tardó otros cuatro días en responderle que se reservaba su custodia.

Para conocer algo más del destino del "Kunyu gezhi" habría que esperar hasta 1643, cuando la corte debatió públicamente su utilidad. Un año después, el once de febrero de 1644, el ministro del tesoro Ni Yuanlu planteó, en petición al trono, varias objeciones contra la aplicación de la técnica europea por su presumible fracaso. La minería, afirmaba, necesitaba grandes inversiones y temía que se produjeran cuantiosas pérdidas; perjudicaría la agricultura; comportaría la profanación de tumbas; afrentaría la concepción geomántica del suelo (las alteraciones de las venas y filones del subsuelo acarrearían infinitas desgracias); arrastraría abusos, corrupción y creación de gravámenes ilegales por parte de los funcionarios de minas; sería carga onerosísima, en forma de impuestos, para las poblaciones cuyas minas no rindieran lo asignado, y, por último, favorecería la aparición de beneficiadores furtivos sin posible control.

Ni expresaba también su contrariedad por la gran aceptación que había encontrado el proyecto. Consideraba que la cuestión atañía a los gobiernos provinciales; sólo a éstos cumplía decidir la aplicación de los proyectos y el emplazamiento adecuado en sus límites territoriales.

Leíase también en su petición al trono que la disposición imperial para la implantación de la minería

había partido después de que el padre Schall von Bell hubiera presentado libros sobre armas de fuego, construcciones hidráulicas y el mismo "Kunyu gezhi". Dado que Li había entregado la traducción hacía ya tres años largos, cabe pensar que Ni se estaba refiriendo a una versión impresa.

El emperador hizo caso omiso de las objeciones de Ni en su relación del 18 de enero de 1644. Juzgaba que los abusos podían controlarse a través de una estricta supervisión gubernativa. Disponía, asimismo, la prosecución de todos los proyectos y su aplicación en los lugares indicados mediante la distribución entre ellos del "Kunyu gezhi".

Una tensión social cada vez más exasperada y una serie de acontecimientos políticos y militares se conjugaron para provocar a la dinastía Ming, que reinaba desde 1368, una situación insostenible. El 25 de abril de 1644, ejércitos rebeldes tomaron Pekín, obligando al emperador a buscar refugio en la Montaña de Carbón. En mayo de ese mismo año, Wu Sangui, uno de sus generales, pactó una alianza con los manchures y el 5 de junio entraba victorioso en la capital. Probablemente, el "Kunyu gezhi" se perdería durante esos sucesos. Pudo ser también en 1827, con la expropiación de la biblioteca jesuítica. O quizá se conservara hasta el 9 de enero de 1864, para desaparecer pasto de las llamas.

¿Cuáles fueron los motivos reales de ese experimento temprano de transferencia tecnológica? ¿A qué se debió tan agrio debate? Los misioneros de la Compañía tenían como objetivo primordial la difusión del cristianismo en aquel reino vastísimo. Pero pronto advirtieron que su mensaje no hacía mella en el pueblo. Por ello, los jesuitas concentraron sus fuerzas en lograr la evangelización de las capas sociales ilustradas y de la corte, intentando una cristianización desde arriba.

Como instrumento principal, se valieron de la oferta de conocimientos científicos y técnicos que, sin ser los más modernos de Europa, sí estaban en distintos campos por encima del nivel de los científicos chinos. En la administración encontraron los jesuitas funcionarios que se percataron de que la aplicación de las nuevas técnicas redundaba en beneficio del estado, al potenciar la producción y los recursos naturales. No distinguían entre tecnología nativa y extranjera, y por ello se dejaron aconsejar por los jesuitas.

La traducción del *De re metallica* se realizó en una época en que se había reavivado el interés por las minas, instado por los gastos militares y el paro de cuantos, careciendo de hogar, amenazaban con nutrir el grupo de bandidos y rebeldes. De haberse mirado el sector minero como un bien por sí mismo, podría haberse favorecido la difusión de la obra de Agricola; pero lo mismo que sucedió con los conocimientos astronómicos de los ignacianos, el "Kunyu gezhi" no salió de los círculos dirigentes. Ahora bien, la reforma de las técnicas mineras era lo último que querían las capas ilustradas y los funcionarios, quienes abogaban por una política económica basada en el fundamentalismo agrario. (Hans Ulrich Vogel, catedrático del departamento de Sinología de la Universidad de Heidelberg.)



Retrato del padre Johann Adam Schall von Bell, misionero jesuita, que tradujo al chino el De re metallica *de Georg Bauer, latinizado Georgius Agricola, en torno a 1660. Viste túnica chica con la insignia de alto funcionario civil, un cisne blanco. El grabado, en cobre, está tomado de la obra* China monumentis qua sacris qua profanis illustrata, *de Athanasius Kircher, publicada en Amsterdam 1667.*

España paleontológica

Jiráfidos

Uno de los principales objetivos que persigue la investigación paleontológica, mediante el establecimiento de la filogenia de los diferentes grupos de organismos, es la reconstrucción global de la historia evolutiva de los seres vivos sobre la Tierra. Los jiráfidos son uno de los grupos de mamíferos fósiles cuyo registro se ha visto notablemente enriquecido por el descubrimiento, en España, de restos de sumo interés, que nos permiten aportar nuevas ideas sobre su historia.

La familia Giraffidae se halla representada hoy en día por dos especies africanas, la jirafa (*Giraffa camelopardalis*) y el okapi (*Okapia johnstoni*). Esta última especie, en vías de extinción, se encuentra limitada a áreas de vegetación muy densa de las selvas ecuatoriales del Zaire. Pero la historia de la familia se inicia en el Mioceno inferior, hace aproximadamente 20 millones de años, coincidiendo con la radiación de los rumiantes con apéndices frontales. Parece ser que el conjunto de los primeros jiráfidos verdaderos se diversificó precozmente, produciendo el florecimiento de grupos que no han pervivido.

Uno de estos grupos, muy frecuente en el registro fósil español, es el de los sivaterinos, compuesto por formas de gran talla, cuello corto, miembros robustos y cráneo provisto de dos pares de protuberancias óseas, llamadas osiconos, bien desarrolladas. El género más representativo de esta subfamilia es *Sivatherium*, que llegó a convivir con el hombre.

Aunque la línea evolutiva representada por la jirafa actual, caracterizada por la posesión de un cuello muy largo y unos miembros muy gráciles, arranca del Turoliense (hace unos 8 millones de años), la mayoría de los jiráfidos fósiles poseen una morfología más parecida a la del okapi, es decir, con cuello corto y aspecto mucho menos grácil.

Se desconoce el origen exacto de la familia Giraffidae, a partir de un hipotético antecesor sin apéndices craneales. Las excavaciones realizadas en los yacimientos del Mioceno inferior de Valquemado y Loranca (Cuenca) y el estudio de los materiales procedentes del yacimiento de Navarrete del Río (Teruel) han aportado el descubrimiento de varios géneros nuevos englobados dentro de un conjunto primitivo de rumiantes con afinidades jirafoides, ya muy diversificado y con una amplia distribución geográfica.

A Valquemado, yacimiento datado como Ageniense (hace unos 23 millones de años), pertenece el más antiguo rumiante jirafoide conocido, quizás una forma inmigrante con un área de origen desconocida. El yacimiento de Navarrete del Río, algo más moderno e inscrito ya en el Rambliense (hace unos 22 millones de años), ha proporcionado una nueva forma, *Teruelia adroveri*, definida a partir de un cráneo carente de osiconos. Dicho cráneo es atribuido hipotéticamente a una hembra, suponiendo que los machos de la especie poseerían protuberancias supraorbitales.

En el yacimiento de Loranca del Campo, incluido también en el Rambliense, se han desenterrado varias piezas que se presumen osiconos, pero cuya interpretación deberá esperar al hallazgo de materiales craneales más completos. Hubo allí un nuevo género de jirafoideo, emparentado con *Teruelia*, cuyo rasgo morfológico más notable es la aparición de una acusada paquiostosis que afecta al radio-cúbito y a los metacarpianos. Dicha anomalía, consistente en un excesivo incremento en el espesor del hueso, se repite en todos los elementos mencionados de la asociación fósil, por lo que hay que descartar una causa patológica.

Los primeros jiráfidos genuinos del registro fósil español surgen durante el Mioceno superior, a principios del Vallesiense (hace unos 11,5 millones de años), aunque ciertos restos podrían remontarse al Aragoniense superior (hace unos 13 millones de años). Se han distinguido dos especies: *Decennatherium pachecoi* y *Birgerbohlinia schaubi*. Los últimos trabajos permiten agrupar el género *Decennatherium* y el *Birgerbohlinia* en la subfamilia de los Sivatheriinae.

No se conocía bien, hasta hace poco, la condición de los osiconos en uno y otro género. Y puesto que uno de los rasgos más utilizados en la sistemática de los rumiantes (jiráfidos incluidos) es el número, morfología y posición de los apéndices craneales, no debe extrañarnos que los expertos vieran en ese par de jiráfidos del Mioceno español unas formas problemáticas.

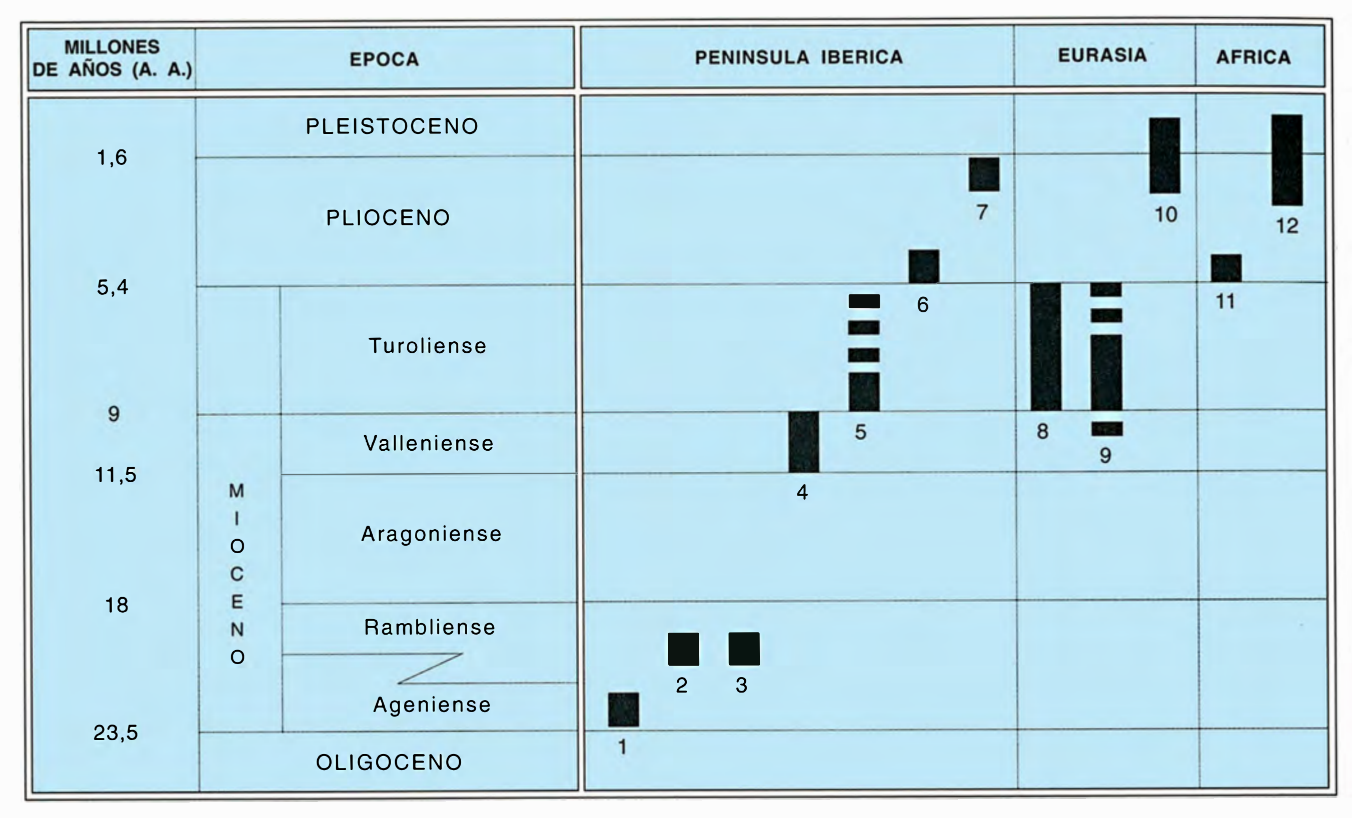
El primer avance serio se produce, en 1984, con la descripción de un cráneo parcialmente completo de *Decennatherium* del yacimiento de Matillas (Guadalajara). Dicha pieza presenta dos osiconos bien desarrollados, ubicados sobre las órbitas oculares, que son muy similares a los de *Sivatherium*; quedaban así despejadas las dudas acerca de la pertenencia de *Decennatherium* a la subfamilia de los sivaterinos.

Pero, ¿y *Birgerbohlinia*? También se resolvió la cuestión con el estudio de los fósiles procedentes del yacimiento de Crevillente 2 (Alicante). Las varias campañas de excavación se han visto recompensadas con un importante conjunto de restos fósiles de este jiráfido, entre los que destaca una asociación de elementos pertenecientes a un mismo cráneo, que incluye tres osiconos completos y fragmentos de un cuarto. Gracias a ello se ha podido confirmar la condición de sivaterino de *Birgerbohlinia*. Los osiconos posteriores son curvados y alcanzan una longitud de más de 50 centímetros, mientras que los anteriores son más bien rectos y la mitad de largos, aproximadamente. Esta morfología difiere de la conocida en las especies más comunes de *Sivatherium*. Así, *Sivatherium giganteum*, del Plioceno de Asia, presenta unos osiconos anteriores palmeados y, por otra parte, *Sivatherium maurusium*, del Plioceno superior y Pleistoceno de Africa, posee los osiconos anteriores muy reducidos y comprimidos lateralmente. Existe, en cambio, una semejanza muy notable, en cuanto a forma y tamaño relativo, con los osiconos de *Sivatherium hendeyi*, del Plioceno inferior de Sudáfrica, que es la especie más antigua dentro del género.

¿En qué queda, pues, la filogenia de la subfamilia Sivatheriinae? Los sivaterinos más primitivos aparecieron en el Vallesiense inferior de España. Se trata de *Decennatherium pachecoi*, quizás una forma inmigrante que alcanzó la península Ibérica por los tiempos en que se produce la entrada en Europa del équido tridáctilo *Hipparion* (hace unos 11,5 millones de años).

En el Turoliense inferior (hace unos 9 millones de años) aparece *Birgerbohlinia*, descendiente directo de *Decennatherium*; sólo se conoce en España. En el Plioceno inferior (hace unos 5 millones de años) aparece, en Africa, el primer sivaterio: *Sivatherium hendeyi*, que muestra una estrecha semejanza con *Birgerbohlinia*.

Pero, ¿qué ocurre en el lapso de 4 millones de años que separa a *Birgerbohlinia schaubi* de *Sivatherium hendeyi*? En el registro fósil de este período se conocen dos sivaterinos citados en el Turoliense eurasiático: *Bramatherium* y *Helladotherium*. La primera de estas formas presenta una morfología craneal, con osiconos an-



Distribución cronológica y geográfica de los jiráfidos mencionados en el texto (el trazo continuo indica la presencia segura y el trazo discontinuo la presencia probable de la especie): 1. forma jirafoide de Valquemado; 2. Teruelia adroveri*; 3. forma jirafoide de Loranca; 4.* Decennatherium pachecoi*; 5.* Birgerbohlinia schaubi*; 6. jiráfidos de La Gloria y La Calera; 7. jiráfido del Plioceno superior de Andalucía; 8.* Helladotherium*; 9.* Bramatherium*; 10.* Sivatherium giganteum*; 11.* Sivatherium hendeyi*; 12.* Sivatherium maurusium.

teriores mayores que los posteriores, que difiere bastante de la descrita para *Birgerbohlinia schaubi* y *Sivatherium hendeyi*, mientras que en *Helladotherium* se desconocen las protuberancias craneales.

Siguen abiertas algunas cuestiones: ¿son el *Helladotherium* europeo y *Birgerbohlinia* formas equivalentes? ¿Se originó *Sivatherium* a partir de *Birgerbohlinia*? La primera de estas preguntas sólo podrá ser contestada mediante el descubrimiento de nuevos restos craneales de *Helladotherium*. Para resolver el segundo interrogante será necesario averiguar qué ocurre con *Birgerbohlinia* a partir del Turoliense inferior; y muy posiblemente podamos buscar la respuesta en el registro de restos de jiráfidos, aunque muy incompletos, tanto en el Turoliense medio y superior como en el Plioceno inferior de España.

La confirmación del origen de *Sivatherium* a partir de *Birgerbohlinia* supondría que hubo migración desde Europa (quizá desde la propia península Ibérica) hacia Africa, posiblemente a fines del Mioceno (hace unos 6 millones de años). Ese fenómeno se muestra coherente con la situación planteada por el modelo que explica la crisis de salinidad del Mesiniense, mediante la desecación parcial del Mediterráneo en dicha época. La desaparición, en gran medida, de la barrera que supone el Mediterráneo propició un notable intercambio faunístico entre Europa y Africa, del que da fe, por ejemplo, la presencia de mamíferos africanos, como camellos e hipopótamos, en el Turoliense superior español.

Desde finales de los años setenta, el estudio de la composición de roedores de los yacimientos españoles del Mioceno reveló una serie de pautas en la distribución faunística, que indujo a proponer una división de la península Ibérica en dos provincias biogeográficas, una mediterránea y otra central, con asociaciones de roedores distintas. Dicha situación, fruto de acusadas diferencias ecológicas entre ambas áreas, se hizo manifiesta durante el Vallesiense y remitió en el Turoliense.

Podemos extender ese fenómeno a la distribución de los jiráfidos. *Decannatherium* está bien representado en el Vallesiense español, pero solamente en los yacimientos pertenecientes al área central de la península. Sorprendentemente, no aparece en los ricos yacimientos catalanes de esta misma época. En cambio, *Birgerbohlinia*, que se encuentra en los yacimientos del Turoliense (hace alrededor de 9 millones de años) de Piera y Crevillente, ambos en el área mediterránea, también ha sido hallada recientemente en Teruel, en el yacimiento de Puente Minero. La presencia simultánea de *Birgerbohlinia* en las dos provincias biogeográficas coincide con la fase de uniformización faunística, observada en los roedores, que se produjo durante el Turoliense. (Plinio Montoya, de la Universidad de Valencia.)

Astronomía solar

Plutón y Caronte

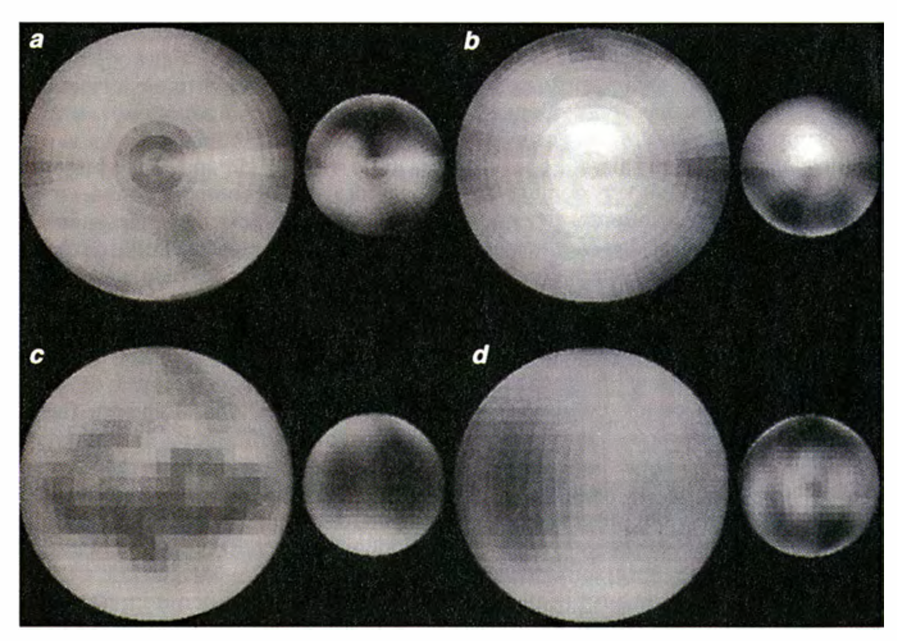
Desde su descubrimiento en 1930, Plutón ha venido considerándose mera excentricidad planetaria. Su órbita elíptica le aleja periódicamente del Sol a una distancia desconocida por el resto del sistema. Se trata de un planeta chico, con unos 2300 kilómetros de diámetro, dos terceras partes del que posee la Luna. Exiguo es también el conocimiento de su estructura y comportamiento, por culpa de la mínima señal luminosa que aparece ante los telescopios.

Pero en un quinquenio reciente, de 1985 a 1990, la naturaleza acudió en auxilio de los astrónomos y les ofreció una ocasión de oro para examinar el relieve y otros detalles de la superficie del planeta. Durante ese intervalo temporal, Plutón y la mayor de sus lunas, Caronte, de 1200 kilómetros de diámetro, estaban alineados vistos desde la Tierra. Caronte simulaba pasar por delante y por detrás del planeta cada 6,4 días, tiempo que tarda el satélite en completar su órbita. A medida que la luna obscurecía la superficie de su planeta, y conforme Plutón iba eclipsando a su satélite, el brillo combinado de uno y otro objeto celeste variaba ligeramente. Tales eclipses mutuos se producen cada 120 años. Deseosos por sacarle el máximo partido a esa coincidencia histórica, varios equipos de investigadores se aprestaron a seguir dichas fluctuaciones del brillo y analizar luego la información para localizar las sombras y las zonas iluminadas de Plutón y de su satélite.

Tras dos años largos de trabajo, han hecho ya públicos sus resultados dos de esos grupos, el encabezado por Marc W. Buie, del Observatorio Lowell, y el dirigido por Richard P. Binzel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Aportan las primeras imágenes pormenorizadas de Plutón y Caronte. Aunque uno y otro equipo han trabajado cada uno por su cuenta, los mapas de la reflectividad superficial que han construido se parecen mucho entre sí, dato en sí mismo positivo. Los mapas nos muestran un Plutón oscuro en las latitudes medias y luminoso en el polo septentrional. Más curioso resulta el brillo intenso que se percibe en el polo sur, fenómeno éste que denuncia una región sometida al barrido de los cambios estacionales.

La región limítrofe con el polo meridional refleja el 98 por ciento de la luz que le llega, lo que provoca una imagen mucho más blanca que la de una superficie de nieve fresca. Brinzel ve, en la signatura luminosa de esta zona, una fina capa de hielo de metano. La atmósfera de Plutón contiene metano que probablemente se evaporó de la superficie del planeta en el momento de su máxima aproximación al Sol, en 1989. A medida que la órbita le va alejando de la vecindad solar, la temperatura del planeta desciende y el metano termina solidificándose en la superficie. En virtud de la orientación que presenta Plutón, el polo sur procede hacia la oscuridad, y en ella persistirá durante medio año plutónico, unos 124 años terrestres. En consecuencia, la escarcha se asentará en la zona fría y sombreada del polo sur del planeta.

Buile y sus colaboradores han levantado mapas de Caronte, además de cartografiar el planeta. Sostienen que el satélite se halla más obscurecido que Plutón; algunas de sus regiones reflejan sólo el 3 por ciento de la luz incidente, la misma reflectividad que un trozo de carbón.



Imágenes reconstruidas de Plutón y Caronte. Esos objetos celestes aparecen vistos desde el norte (a) *y desde el sur* (b). *El grupo de Marc W. Buie, del Observatorio Lovell, ha recreado un juego de hemisferios a partir de los datos recabados de los eclipses* (c) *y el otro* (d) *a partir de las observaciones de curvas de luz rotacionales.*

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Plácido salto del lagarto volador

Por tres veces, y siguiendo tres patrones diferentes, el quiridio de los vertebrados se ha convertido en ala. Ocurrió con los pterosaurios y persiste hoy en las aves y los murciélagos. Se trata, en los tres tipos, de modificaciones de las extremidades anteriores. Las aletas, si queremos ser exhaustivos, constituyen otra adaptación del quiridio o esbozo de miembro marchador.

Pero la naturaleza ha ideado otros recursos para simular el vuelo. Hay en Indonesia unos lagartos voladores capaces de salvar vanos de hasta veinte metros o más. Poseen, por alas, una membrana sostenida por costillas abdominales que va de patas delanteras a patas traseras sin que suponga ninguna modificación de los apéndices.

Acostumbrados como estamos a la estampa del lacértido tomando el sol sobre una piedra del camino o en un muro de los aledaños de los pueblos, el vulgo apenas conoce qué hay debajo de su exoesqueleto escamoso y del escudo cefálico característico. Sin embargo, su endoesqueleto —de muchísimas vértebras, esternón en placa romboide cartilaginosa y cráneo de fino mosaico óseo— es un auténtico prodigio de la evolución para hacer frente a la vida en tierra firme.

Por su valor informativo los textos de zoología toman la organización del lagarto para explicar el plan general de los reptiles. A mí me encanta, además, detenerme en las notas etológicas de los viejos libros de historia natural. Como en el clásico Constant Duméril, de comienzos del siglo pasado: "A diferencia de las sierpes, no dilatan las mandíbulas; se alimentan de otros seres vivos; emiten un sonido débil, un silbido sordo."





Foto de la derecha
distancia focal: 105 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/25.000 de segundo
película: ISO = 100



Las histonas, proteínas reguladoras de genes

Reputadas antaño puro material de empaquetamiento del ADN nuclear, estas proteínas están capacitadas para ejercer una doble misión: bloquear la activación de muchos genes o promover, por contra, su expresión

Michael Grunstein

Las histonas se combinan en el núcleo de la célula con largas hebras de ADN, que contienen los genes, para formar la cromatina, el material que constituye los cromosomas. Apenas cinco años atrás, suponíase que esas proteínas pequeñas no intervenían en la regulación de los genes y tenían la misión exclusiva de servir de material de empaquetamiento celular. Venían a ser una suerte de "bobinas" dotadas de carga positiva, a cuyo alrededor se enrollarían las hebras de ADN cargadas negativamente para así poder encajar en el interior del diminuto núcleo celular.

Pero la investigación tenaz acaba de demostrar que nos hallamos ante partícipes activos en la regulación de los genes. Un tipo por lo menos de histonas colabora en la activación: ayuda a iniciar la copia, o transcripción, de la información almacenada en ADN a las moléculas del ARN mensajero. (Estos transcritos son los moldes a partir de los cuales se sintetizan las proteínas.) Ciertas histonas reprimen también la transcripción. En resumen, si queremos conocer el mecanismo de control de los genes hemos de atender al comportamiento de las histonas.

El interés por el mecanismo de activación y desactivación génica obedece, en parte, a que constituye la condición para adentrarse en el desarrollo embrionario de los organismos pluricelulares. Si bien la inmensa mayoría de las células de un organismo en desarrollo presentan la misma dotación de genes, unas se diferenciarán para convertirse en neuronas, otras en células sanguíneas, o hepáticas, por ejemplo. El estado final varía en gran medida por la activación, o desactivación, de distintos genes en el instante apropiado, produciendo mezclas peculiares de enzimas o proteínas que confieren a cada célula sus propiedades características.

MICHAEL GRUNSTEIN, de origen rumano, enseña, desde 1975, biología molecular en la Universidad de California en Los Angeles. Inició su formación en la Universidad de McGill y la culminó con el doctorado en la de Edimburgo, en 1971.

El ahondar en el proceso de activación y en el de represión de los genes nos facilitará desentrañar el motivo por el que fallan a veces los controles de dichos procesos, con resultados patológicos. A modo de ejemplo, el cáncer puede originarse por culpa de una actividad desbordada de los genes cuyos productos proteicos promueven la replicación de las células o por culpa de la inactividad anómala de los genes que suspenden la replicación.

Las funciones reguladoras de las histonas pasaron inadvertidas hasta hace poco. Influyó en ese retraso el haberse conseguido la transcripción tras exponer ADN desnudo (libre de histonas) a extractos celulares que contenían proteínas reguladoras seleccionadas. Ante el éxito de los experimentos "sin células enteras", se concluyó que, en los organismos, las histonas no participaban en la regulación génica.

La falsedad de la conclusión no fue óbice para que ese tipo de estudios, y otros, permitieran adentrarse en los mecanismos de activación de los genes. Investigaciones que, junto con los análisis estructurales de la cromatina, prepararon también el camino que al fin condujo al descubrimiento de la importancia de las histonas.

Desde muy pronto se estableció que los genes de las células eucariotas (nucleadas) poseían, por los menos, tres segmentos especializados. Entre éstos se encuentra, naturalmente, la región codificadora, que especifica la secuencia aminoacídica de una proteína. Los otros son regiones distintas que influyen sobre el segmento de codificación y determinan si éste ha de copiarse en ARN mensajero y cuántas moléculas de ARN deben sintetizarse.

Para que un gen se active, ha de constituirse un grupo especial de proteínas en una región reguladora, que suele recibir el nombre de región promotora proximal. De entrada, una proteína se une a cierta parte de dicho promotor, la caja *TATA*. Después, se van unciendo otras proteínas a la primera, dando lugar a una combinación de proteína y ADN: el complejo de preiniciación. La caja *TATA* debe su denominación a la secuencia nucleotídica *TATAAATA*, porque la abarca en cierto grado. Los nucleótidos, que son los sillares del ADN, se distinguen por su base química: timina (*T*), adenina (*A*), guanina (*G*) o citosina (*C*).

Una vez formado, el complejo de preiniciación coloca a uno de sus integrantes —la enzima ARN polimerasa— dentro del promotor proximal, en el lugar de iniciación de la transcripción. La polimerasa, bien

1. PROTEINAS HISTONAS H3 (*azul*) y H4 (*verde*), capaces de doblar el ADN (*anillo pardo dorado alrededor de las histonas*) en este corte fino, de delante hacia atrás y a través de un mapa tridimensional de un nucleosoma. Los nucleosomas constituyen un rasgo estructural característico de los cromosomas de todas las células nucleadas. Se ha demostrado que las histonas ejercen funciones reguladoras de las actividades de los genes contenidos en los cromosomas.

alojada, avanza y retrocede a lo largo de la región codificadora (a modo de vagoneta sobre los raíles), sintetizando ARN mensajero. El reconocimiento del ADN por las proteínas del complejo de preiniciación, si se dan las condiciones adecuadas, genera en el tubo de ensayo una transcripción con un nivel bajo, o basal; de ahí viene que a estas proteínas se les llame factores basales.

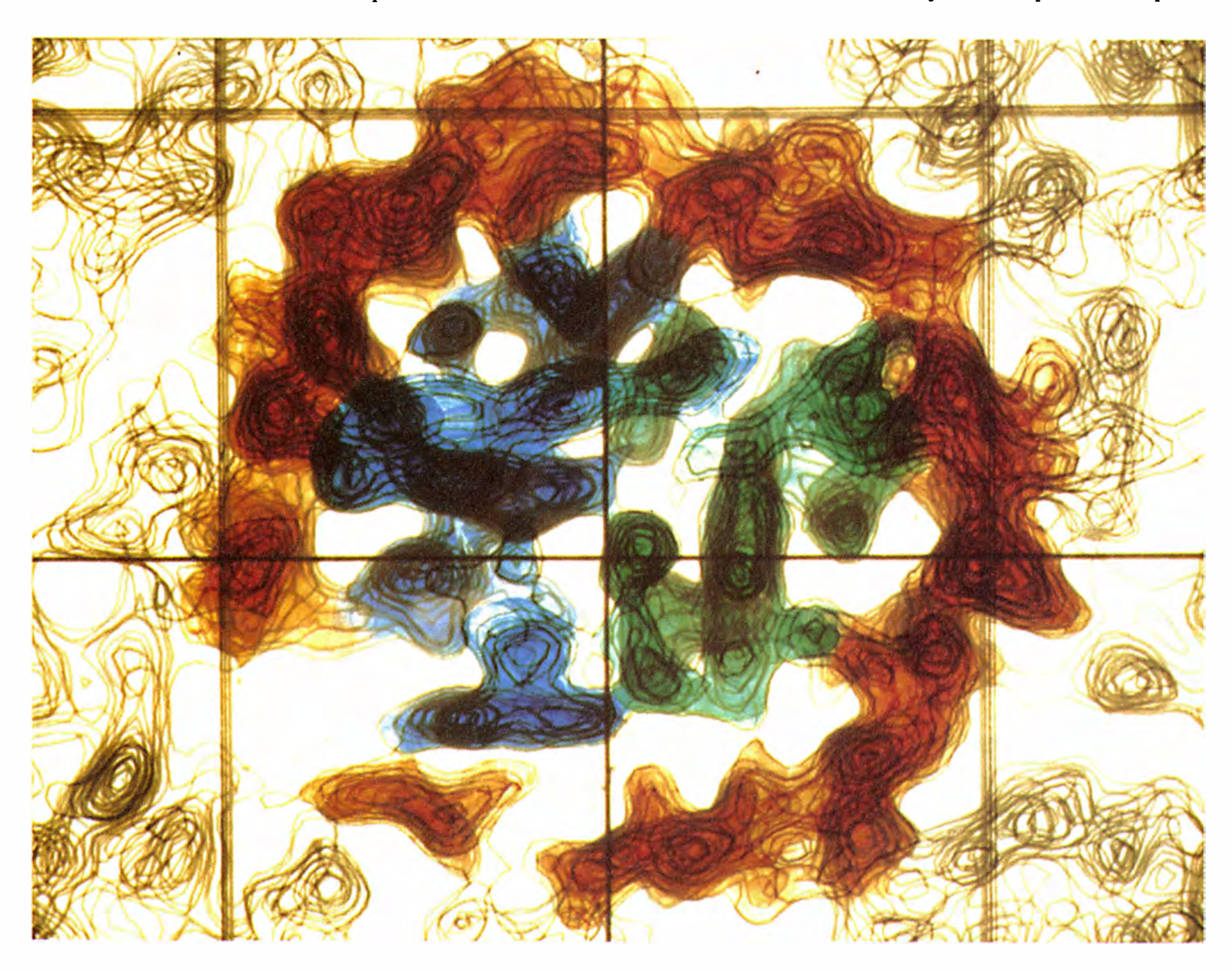
Otras proteínas, las activadoras, se engarzan en un segundo lugar regulador: en la secuencia activadora curso arriba del ADN ("upstream"); el acoplamiento desencadena la producción máxima de mensajero. En muchos organismos eucariotas, las secuencias activadoras curso arriba del ADN responden también al nombre de intensificadores ("enhancers").

La investigación en la química y estructura de la cromatina había determinado, desde hacía tiempo, las cinco categorías fundamentales de histonas: H1, H2A, H2B, H3 y H4. Se demostró luego, por cristalografía de rayos X y otras técnicas, que las "bobinas" donde se arrolla el ADN eran octámeros, constituidos por ocho moléculas —dos de la histona H4, combinadas con dos de las histonas H3, H2A y H2B. Una cinta formada por 146 nucleótidos de ADN da dos vueltas casi enteras alrededor del octámero, o núcleo de la histona; la unidad resultante es el nucleosoma.

En la mayoría de los eucariotas, el ADN queda aún más anclado al sitio por una sola molécula de H1. Esta histona, además de agarrarse a la superficie externa del ADN que rodea el octámero, se traba también con ambos tramos de los flancos, o "conectores" ("linkers"), del ADN que ligan un nucleosoma a otro. Pero la histona H1 no es imprescindible para la formación de los nucleosomas. Citemos, como botón de muestra, la levadura de panadero o de cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*); este eucariota unicelular, que ha prestado tantos servicios al conocimiento de la regulación génica, produce muy poca histona, si es que la produce; lo que no impide que abunden los nucleosomas en los cromosomas de la levadura.

Por otra parte, la H1 parece promover la compactación del ADN en los organismos pluricelulares. En sus células, buena parte de la cromatina se arrolla en fibras de unos 30 nanómetros (mil millonésimas de metro) de diámetro; los arrollamientos abarcan unos 6 nucleosomas por vuelta. Lo cual contrasta con la cromatina de la levadura de panadero que, en su mayor parte, permanece desplegada; parecida a un cordón (ADN) con nudos (nucleosomas), mide, en su mayor parte, 10 nanómetros de diámetro: la talla de un nucleosoma.

Hacia mediados de los años ochenta, algunos habían comenzado a poner a prueba una idea controvertida, la de la posible intervención, en la regulación génica, de otros miembros, amén de las cajas *TATA*, de los elementos activadores curso arriba del ADN y las proteínas especializadas que se ligan a ellos (los factores basales y las proteínas activadoras). Las histonas podrían tener también algún papel. Veinte años antes, en la década de los sesenta, algún que otro trabajo había apuntado la posi-



bilidad de que las histonas bloquearan la transcripción. Pero las pruebas eran muy endebles.

En los ochenta, el progreso científico permitía estudios más definitivos. Concurría, además, cierto descubrimiento relacionado con la evolución. Los análisis de las secuencias aminoacídicas de las histonas ponían de manifiesto que las proteínas del núcleo histónico apenas diferían de una especie a otra. De manera palmaria, las histonas del guisante se parecen llamativamente a las de la vaca. Siempre que la estructura de una molécula varía en un mínimo grado de una especie a otra, se entiende que su secuencia de aminoácidos reviste sumo interés para el funcionamiento de la célula. Si las histonas limitaran su misión a servir de instrumento para el plegamiento del ADN, cualquier secuencia, o casi, rica en aminoácidos cargados positivamente podría valer para plegar el ADN, dotado de carga negativa; no hubiera sido necesario conservar, con semejante rigor y a lo largo de millones de años, las secuencias de aminoácidos.

El sólido respaldo que avala la idea de la intervención de las histonas en el control génico procede, en parte, de los estudios en medios libres de células. En 1986, Joseph A. Knezetic y Donal S. Luse, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Cincinnati, combinaron histonas con moléculas de ADN que contenían genes de un adenovirus humano. Cuando introdujeron fracciones de las células humanas que incluían los factores basales (entre ellos, ARN polimerasa), los nucleosomas recién formados impidieron que los factores incoaran la transcripción.

El grupo de Roger D. Kornberg demostró entonces que la inclusión selectiva de cajas *TATA* en los nucleosomas evitaba que la ARN polimerasa iniciara la transcripción. Kornberg y, de manera independiente, Donald D. Brown, de la Institución Carnegie de Washintgon, lograron, además, otro avance importante. Al inducir la formación de nucleosomas en el seno de la región codificadora, no se bloqueó la transcripción. (La investigación ulterior demostraría,

Estructura del nucleosoma

Se forma un nucleosoma (*a*) cuando las histonas se combinan entre sí, haciendo que el ADN (*el tubo de la representación esquemática*) dé un par de vueltas en torno al complejo de histonas resultante. Esta partícula, o núcleo nucleosómico, abarca en su centro dos copias de la histona H3 (*azul*) y otras dos de la H4 (*verde*). El tetrámero H3-H4 está flanqueado por dos pares H2A-H2B, o dímeros (*amarillo y púrpura*), uno de los cuales no se ve. Cada molécula de histona se proyecta en una cola (*cintas pálidas*) desde la partícula nuclear hacia el exterior, preparada para interaccionar con otras moléculas. (Se desconoce la conformación exacta de la cola.) En muchos organismos (quizá no en todos), la histona H1 (*estructura gris a la izquierda*) facilita el anclaje de ADN en la partícula nuclear. Nucleosomas y ADN libre de histonas que los mantiene unidos forman la cromatina (*b-d*). Al promover el empaquetamiento de los nucleosomas, la histona H1 ayuda a la cromatina a enrollarse en fibras de 30 nanómetros (*esquema y micrografía en b*). Los genes comprendidos en el ADN dentro de esas fibras de 30 nanómetros de diámetro permanecen inactivos. El desenrollamiento de la cromatina hasta alcanzar una conformación de 10 nanómetros (*c*) la hace más propicia para la activación de los genes. Para que los genes acaben tornándose activos, el ADN debe desenrollarse parcialmente de los nucleosomas por las secuencias implicadas en la regulación génica (*d*).

sin embargo, que los nucleosomas podían frenar las idas y venidas de la ARN polimerasa.)

Considerados en conjunto, estos resultados indican que las histonas podrían colaborar en la represión de los genes dentro de células enteras. Sin suspender del todo la transcripción dentro de la región codificadora, podrían evitar que los factores basales encerrasen el ADN. E inversamente, si los genes habían de activarse, parecía probable que las partículas núcleo de las histonas se desengarzaran de la caja *TATA*.

A tenor de otras pruebas con extractos libres de células, las proteínas activadoras —las moléculas que se unen a las secuencias activadoras curso arriba del ADN— ejercerían verosímilmente una influencia disociadora en los nucleosomas. Ya en 1984, Beverly M. Emerson y Gary Felsenfeld, del Instituto Nacional de la Salud, habían demostrado que las proteínas que se unían a secuencias reguladoras del ADN obstaculizaban la formación de nucleosomas en esos sitios. Más tarde, Luse, Robert G. Roeder, de la Universidad Rockefeller, y otros generalizaron, cada grupo por su lado, esa idea. Demostraron que las histonas y los factores basales competían por acceder a la caja *TATA*.

Los laboratorios señalados modificaron el orden de exposición del ADN a histonas y factores basales. Pues bien, la transcripción sólo se producía si se concedía a los factores la oportunidad de asociarse con los elementos *TATA* antes de añadir las histonas. Las histonas ganaban, por contra, cuando los competidores se añadían al ADN simultáneamente.

En el curso de esa serie de experimentos, Jerry L. Workman, Roeder y su equipo de la Rockefeller se apuntaron un curioso hallazgo. Sus datos sugerían que, si el ADN se exponía simultáneamente a histonas y extractos celulares dotados de factores basales y proteínas activadoras, la suerte se inclinaba a favor de los factores basales. Estos se anclaban en las cajas *TATA*, a pesar de la presencia de histonas, e impedían así que las cajas *TATA* se incorporasen en los nucleosomas. El grupo de James T. Kadonaga, de la Universidad de California en San Diego, había demostrado con técnicas parecidas que los activadores bloqueaban la represión de la transcripción por la histona H1 *in vitro*.

¿Qué sugerían esos resultados? Una posibilidad del mayor interés: las proteínas activadoras podrían colaborar, directa o indirectamente, a debilitar la unión entre histonas y ADN en las células; en concreto, un activador podría alterar algún factor basal en el complejo de preiniciación, capacitando a la proteína para disociar los nucleosomas y ganar acceso al elemento *TATA*.

Los estudios con extractos celulares son muy útiles, lo que no significa que los resultados reflejen, necesariamente y con precisión, el funcionamiento de las células en los organismos. Así pues, en paralelo con el trabajo sobre extractos celulares libres, y en ocasiones en respuesta a esa técnica, varios laboratorios, incluido el mío de la Universidad de California en Los Angeles, se centraron en el papel desempeñado por las histonas en las células vivas. Había que responder a cuestiones del tenor siguiente: ¿se incorporan siempre de manera rutinaria las cajas *TATA* en los nucleosomas? ¿Reprime la partícula nuclear de histonas la transcripción cuando se ha unido a los elementos *TATA*? ¿Cómo podrían debilitarse los enlaces entre octámeros de histonas y ADN en los nucleosomas ya formados?

Los grupos encabezados por Dennis E. Lohr, de la Universidad de Arizona, y Wolfram Horz, de la de Munich, reunieron algunas de las pruebas más sólidas de la formación frecuente de nucleosomas en las cajas *TATA*. Muchos genes de la levadura de panadero exponen, de manera regular, nucleosomas en el elemento *TATA*. Entre dichos genes se hallan los que especifican las enzimas galactoquinasa (*GAL1*) y la fosfatasa ácida (*PHO5*).

Pusieron también de manifiesto que la activación de esos genes se acompañaba de la liberación, del ADN, de los nucleosomas asociados con las cajas *TATA*. Los investigadores sabían que se producía cierto grado de disociación en los genes activos, ya que las nucleasas (enzimas que rompen el ADN) cortaban con mayor soltura las regiones portadoras del elemento *TATA*, corte que sólo es posible si el ADN se endereza lo suficiente para quedar expuesto a la acción de las nucleasas.

Pero no acababa de quedar clara la relación causal. ¿Debíase a los cambios estructurales del nucleosoma la transcripción? ¿O eran acaso estos cambios una consecuencia del deslizamiento de la ARN polimerasa a lo largo del gen?

A finales de los ochenta, mi laboratorio decidió abordar el problema de la manipulación de los genes de las histonas de la levadura. La biología y la industria cervecera habían descifrado ya buena parte de la dotación génica de ese organismo; así que optamos por él. Como también resultó una suerte el disponer entonces de herramientas que permitían hacer cortes y empalmes y combinar los elementos genéticos de las levaduras con fines experimentales.

Si lográbamos impedir la síntesis de las histonas, evitaríamos, pensábamos, que las cajas *TATA* de muchos genes normalmente reprimidos quedasen atrapados en los nucleosomas. Si en tales circunstancias se produjeran los ARN mensajeros de estos genes, habríamos demostrado que es la separación de las histonas lo que posibilita la transcripción, no sólo en el tubo de ensayo sino también en las células vivas. El hallazgo indicaría también que las histonas pueden reprimir los genes en las células vivas.

Min Han y Ung-Jin Kim, alumnos de doctorado de mi laboratorio, suspendieron la síntesis de las histonas adaptando una técnica diseñada por Mark Johnston, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington. Introdujeron elementos reguladores del gen de la galactoquinasa en las regiones codificadoras de los genes que determinan histonas. Sustituyeron entonces estos genes por las versiones normales en las células de levadura. Cuando las células así alteradas se cultivan en un medio enriquecido en glucosa, la secuencia reguladora de la galactoquinasa evita la transcripción de los genes asociados a ella. Por tanto, para detener la síntesis de histonas Han y Kim sólo tenían que exponer a la presencia de glucosa la levadura alterada genéticamente.

Al principio del tratamiento, las células atravesaban distintos estadios del ciclo vital de la levadura. A diferencia de lo que ocurre con muchas células de mamíferos (por ejemplo, las neuronas), las células de levadura crecen sin solución de continuidad y se dividen (por gemación), a no ser que las condiciones ambientales amenacen la supervivencia de las nuevas células. Conforme los cromosomas del organismo se van duplicando durante la división celular, los dos conjuntos se segregan. Uno se entrega a la yema emergente, que acaba desprendiéndose para convertirse en célula independiente.

Suspendida la síntesis de histonas,

las células de levadura alteradas genéticamente reprodujeron su ADN una vez sin dificultad. Pero éste portaba aproximadamente la mitad del número habitual de nucleosomas. Y lo que encerraba mayor interés: los análisis de los productos de la digestión con nucleasa indicaban que la mayoría de los nucleosomas que quedaban no ocupaban las posiciones acostumbradas; estaban, por contra, colocados al azar. Más aún, nuestros hallazgos señalaban que las cajas *TATA,* habitualmente incluidas en los nucleosomas, se encontraban ahora en libertad. De este modo, los cromosomas se asemejaban al ADN desnudo, satisfaciendo así nuestros requisitos experimentales.

Han y Kim procedieron a medir la cantidad de ARN producido por muchos genes en levaduras deplecionadas de nucleosomas. En 1988 descubrieron que sólo los genes activados en respuesta a dicho vaciado nucleosómico pertenecían al tipo inducible. Genes que permanecen silenciosos a no ser que la célula quede expuesta a un cambio en el nivel de un azúcar, un aminoácido determinado u otro estímulo similar. A la inversa, los genes encargados de la intendencia doméstica, cuyos productos se necesitan permanentemente para el cumplimiento de las funciones celulares, no se activaron por encima de lo ordinario.

Se trata, el último, de un resultado que no debe sorprender si es correcta la afirmación de que los nucleosomas reprimen la transcripción. Es de esperar que los genes de uso continuo carezcan de nucleosomas en sus cajas *TATA*, antes incluso de que se acometan los ensayos. Los procedimientos diseñados para eliminar las histonas del ADN no tienen por qué afectarlos.

El examen atento de los genes inducibles proporcionó un apoyo más directo a la hipótesis de la represión. Por manipulación genética, Han y Linda K. Durrin descubrieron que, para muchos de esos genes, la eliminación de los nucleosomas en torno a las cajas *TATA* conducía a la síntesis de ARN mensajero, síntesis que movió a pensar que los factores basales se hallaban unidos a las cajas *TATA*. La transcripción se produjo faltando incluso secuencias activadoras curso arriba del ADN; ello indica que basta la eliminación de los nucleosomas asociados con las cajas *TATA* para iniciar la transcripción en su nivel basal. Para algunos genes, sin embargo, hubo que restablecer la secuencia activadora curso arriba del ADN al objeto de que la transcripción alcanzara su velocidad máxima.

Para mi grupo, semejante comportamiento debe entenderse en el sentido de que, al formarse los nucleosomas, las histonas reprimen la transcripción en las células vivas. Basándonos en los estudios *in vitro*, hemos propuesto un modelo mejorado, en dos etapas, para explicar la activación génica.

En la primera, la etapa de activación dependiente de histonas, las proteínas activadoras colocadas sobre la secuencia activadora corriente arriba del ADN consiguen directa o indirectamente que el núcleo de histona se disocie de la caja *TATA*. La liberación de dicha partícula facilita que los factores basales se asocien a la caja *TATA* y formen un complejo de preiniciación, generando con ello una transcripción de nivel basal.

En la segunda etapa, independiente de las histonas, los activadores estimulan el complejo de preiniciación para alcanzar la máxima síntesis de ARN. En nuestra opinión, pues, muchos consiguen a veces la activación *in vitro* en ausencia de histonas porque podrían estar replicando sólo los episodios finales del proceso de activación.

En 1988 Fred Winston y su equipo, de la facultad de medicina de Harvard, reunieron otros datos celulares que denunciaban la implicación de las histonas en la regulación génica. El grupo de Winston desarrolló su técnica a la sombra del descubrimiento del laboratorio Gerald R.

2. MODELO DE LA ACTIVACION GENICA centrado en el ADN desnudo, libre de histonas. Los genes incluyen una región codificadora (*banda azul en el extremo de la derecha en 1*), que especifica la secuencia aminoacídica de una proteína, y dos regiones reguladoras importantes: el promotor proximal (*banda amarilla*) y la secuencia activadora curso arriba del ADN (*banda verde*); estas dos regiones determinan si se sintetiza o no la proteína codificada. El modelo sostiene que, si un gen tiene que activarse (*2*), las proteínas conocidas por factores basales (*rojo*) deben ensamblarse sobre la caja *TATA* dentro del promotor (*segmento amarillo en el extremo de la izquierda*). Este ensamblaje coloca un factor basal —la enzima ARN polimerasa— sobre el punto de iniciación de la transcripción, o sitio I (*segmento amarillo en el extremo de la derecha*), que capacita a la enzima para copiar, o transcribir, la información de la región codificadora en el ARN mensajero (el molde a partir del cual se sintetiza la correspondiente proteína). El ligamiento de las llamadas proteínas activadoras (*violeta en 3*) a la secuencia activadora curso arriba del ADN se traduce en una ulterior estimulación del complejo basal (*flecha segmentada*) y eleva la transcripción a su grado máximo (*flecha gruesa*).

Fink en el Instituto Whitehead: en algunas células mutantes de levaduras, el segmento "transponible" TY, del ADN, se inserta cerca de la caja *TATA* del gen *HIS4*. (*HIS4* no especifica una histona; codifica una enzima relacionada con el empleo de histidina, un aminoácido). La inserción hace que la transcripción comience dentro del elemento TY, y no por el gen *HIS4*. Este error supone la producción de un transcrito sin sentido, incapaz de dirigir la síntesis de la proteína His4.

El grupo de Winston demostró que, si alteraba el número de copias de los genes de las histonas H2A y H2B en la levadura, se esquivaba el efecto represor de TY y se obtenía la transcripción correcta del gen *HIS4*. Este levantamiento de la represión de *HIS4* dejaba claro que, en la regulación génica, correspondía a las histonas un papel que nadie había pensado concederles antes.

Los datos acumulados prestan sólido respaldo a la idea según la cual no puede explicarse adecuadamente la regulación génica si sólo se atiende a las interacciones entre ADN y proteínas no histonas. La eliminación de la represión controlada por las histonas constituye el primer paso, necesario, para la activación de un gen eucariota silencioso. Y si ello es así, lo importante ahora estriba en conocer cómo se relajan los lazos que mantienen unido el núcleo de histona a la caja *TATA*.

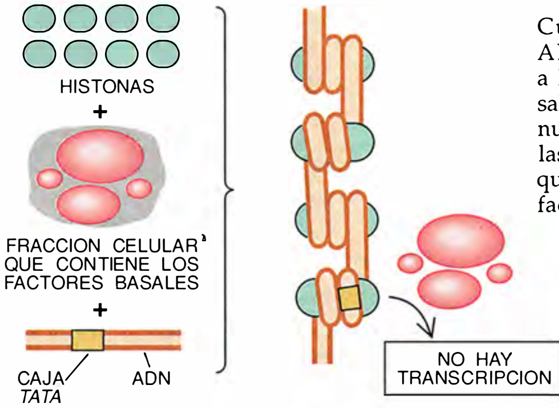
Comparto con mis colaboradores el convencimiento de que esa relajación resulta, verosímilmente, de uniones específicas entre proteínas activadoras, o un intermediario suyo, y el segmento de la "cola" de una de las histonas, la H4. Cada histona se divide dentro de la bobina octamérica en dos dominios fundamentales. El dominio central, o nuclear, que incluye el extremo carboxílico (COOH) de la proteína, se enrolla en hélices hidrofóbicas muy prietas. Estas hélices se enredan a su vez para configurar el componente mayoritario del octámero de histonas. Por contraste, el dominio de la cola, que incluye el extremo amino (NH_2), es hidrofílico. Permanece suelto, como un cabo.

La razón de que abordáramos el posible papel regulador de las colas de las histonas debióse, en parte, a lo demostrado por Harold Weintraub, hoy en el Centro de Investigación sobre el Cáncer Fred Hutchinson de Seattle, y por James Whitlock y Robert T. Simpson, del NIH; a saber: que los cabos tenían poco que ver con el ensamblaje y estabilidad de

Experimentos *in vitro* decisivos

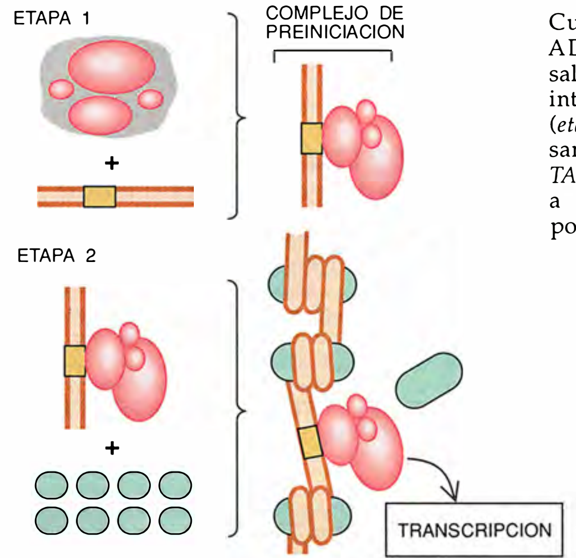
En las postrimerías de los años ochenta, el estudio realizado con extractos de células humanas evidenció que las histonas y los factores basales competían por el acceso a las cajas *TATA*, con victoria habitual de las histonas (*experimento 1*), salvo cuando concurrían circunstancias especiales (*experimentos 2 y 3*). Y así comenzó a sospecharse que las proteínas activadoras, o las proteínas sobre las que éstas influyen, podrían ser los agentes que liberan las cajas *TATA* de los nucleosomas en el interior celular para proceder a la transcripción.

EXPERIMENTO 1



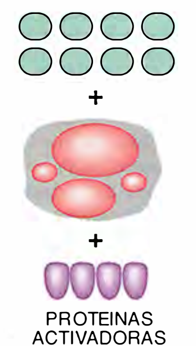
Cuando se expone el ADN simultáneamente a histonas y factores basales, las histonas forman nucleosomas en torno a las cajas *TATA* y bloquean el acceso de los factores basales.

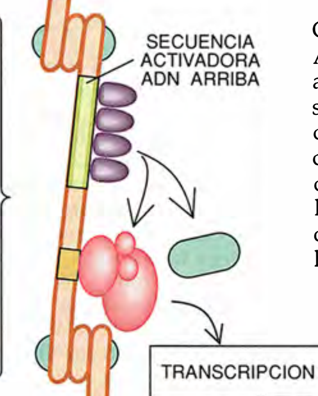
EXPERIMENTO 2



Cuando se expone el ADN a los factores basales, antes de que se introduzcan las histonas (*etapa 1*), aquéllos se ensamblan cabe las cajas *TATA* y cierran el paso a las histonas añadidas posteriormente (*etapa 2*).

EXPERIMENTO 3





Cuando se expone el ADN simultáneamente a histonas, factores basales y proteínas activadoras, estas últimas facilitan el acceso y unión de los factores basales a las cajas *TATA*, y bloquean el acceso de las histonas.

los nucleosomas. Se extienden a modo de prolongaciones de las hélices. Comparados con los dominios del núcleo, están potencialmente más abiertos a las interacciones con otras moléculas en el entorno local de la cromatina.

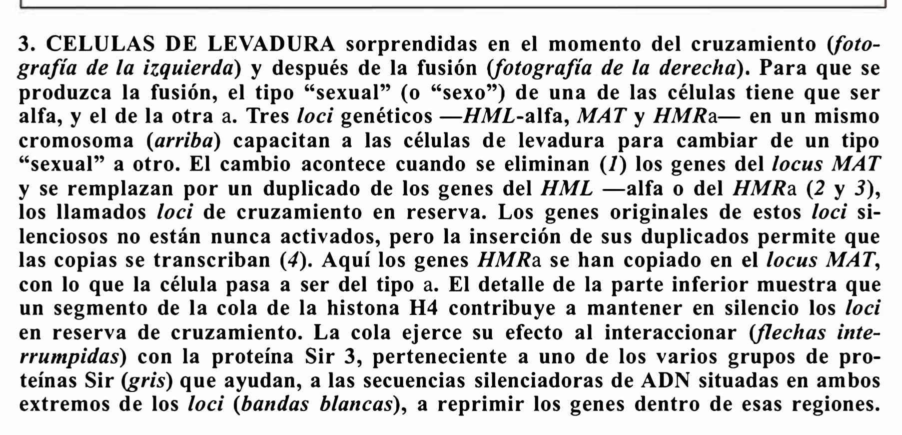
Otros trabajos, un tanto desconcertantes, avivaron también nuestro interés por las "colas". En 1977, el grupo de Vincent G. Allfrey, del Instituto Rockefeller, había observado que la transcripción solía ir acompañada de la adición de grupos acetilo (CH_3CO) a las colas de las histonas. Cabía esperar que esas adiciones neutralizaran las cargas positivas de las colas, lo que a su vez podría provocar una interrupción potencial de la interacción entre colas y ADN dotado de carga negativa. (No sabemos todavía si la acetilación precede o sigue a la transcripción.) El hallazgo sugería que las colas podrían liberar de las cajas *TATA* a los nucleosomas.

En 1991 Durrin daba consistencia a semejante posibilidad. Al eliminar los aminoácidos comprendidos entre la posición 4 y la 23 de la cola de la histona H4, quedaron bloqueados en buena medida varios de los genes de la levadura normalmente inducibles, incluidos los implicados en el metabolismo de la galactosa. La inhibición indujo a pensar que todo el segmento eliminado, o parte de él, interaccionaba normalmente con la maquinaria de la transcripción.

El hallazgo de Durrin nos llevó a amplificar la etapa de activación dependiente de las histonas en nuestro modelo de regulación de los genes. Y avanzamos la hipótesis según la cual las proteínas activadoras, o las proteínas sobre las que influyen, desplazan a las histonas de la caja *TATA* mediante la unión específica con algún segmento de la región comprendida entre los aminoácidos 4 y 23 de la cola de la histona H4.

Podemos ya imaginarnos hoy un mecanismo en cuya virtud esa unión facilitaría la transcripción. Nuestras ideas arrancan del modo en que entendemos la formación de los nucleosomas y de lo que ocurre en su liberación. Abraham Worcel, de la Universidad de Princeton, ya fallecido, tuvo mucho que ver en nuestro enfoque. Sugirió que el primer paso hacia la construcción del nucleosoma era el ensamblaje de dos moléculas de histona H3 y dos moléculas de histona H4, que originaba un tetrámero. El ADN envolvía entonces al tetrámero, entrando en contacto con las cuatro moléculas. (Felsenfeld y Alan P. Wolffe, del NIH, y Kensal E. Van Holde, de la Universidad estatal de Oregón, han confirmado las estabilidad del tetrámero, amén de mostrar que en muchos aspectos se comporta como un nucleosoma entero.)

Otros trabajos prueban que esta estructura parcial dirige la adición subsiguiente de dos pares o dímeros de histonas H2A-H2B al tetrámero, incorporación que promueve, a su vez, el retorcimiento ulterior del

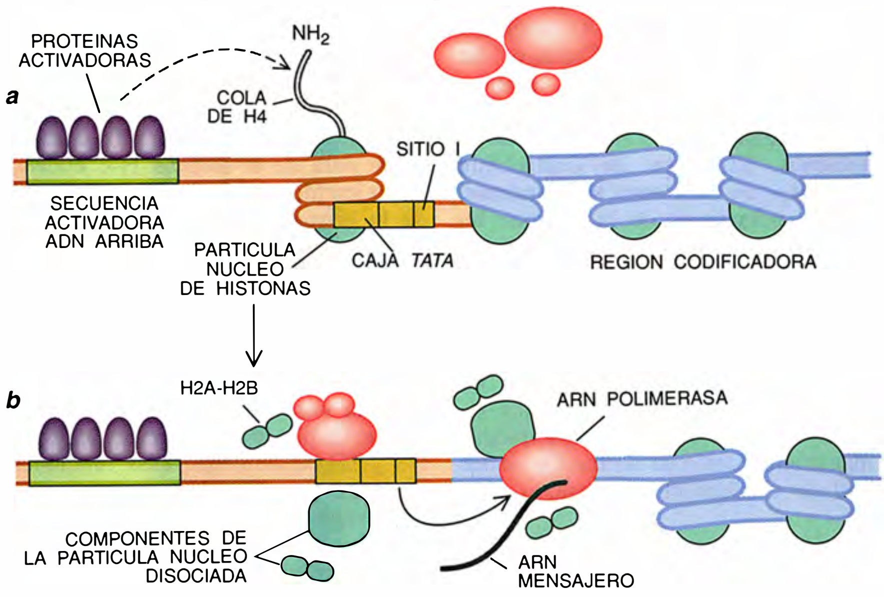


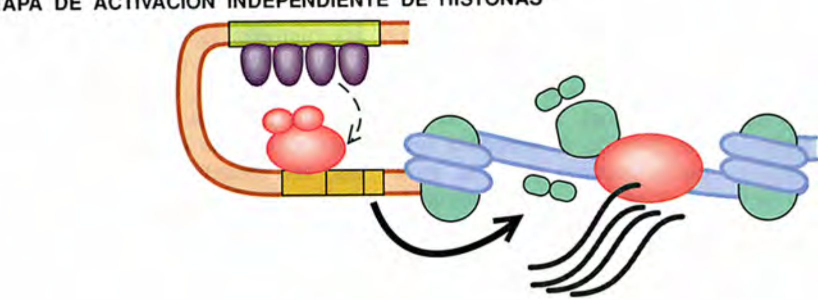
3. CELULAS DE LEVADURA sorprendidas en el momento del cruzamiento (*fotografía de la izquierda*) y después de la fusión (*fotografía de la derecha*). Para que se produzca la fusión, el tipo "sexual" (o "sexo") de una de las células tiene que ser alfa, y el de la otra a. Tres *loci* genéticos —*HML*-alfa, *MAT* y *HMR*a— en un mismo cromosoma (*arriba*) capacitan a las células de levadura para cambiar de un tipo "sexual" a otro. El cambio acontece cuando se eliminan (*1*) los genes del *locus MAT* y se remplazan por un duplicado de los genes del *HML* —alfa o del *HMR*a (*2* y *3*), los llamados *loci* de cruzamiento en reserva. Los genes originales de estos *loci* silenciosos no están nunca activados, pero la inserción de sus duplicados permite que las copias se transcriban (*4*). Aquí los genes *HMR*a se han copiado en el *locus MAT*, con lo que la célula pasa a ser del tipo a. El detalle de la parte inferior muestra que un segmento de la cola de la histona H4 contribuye a mantener en silencio los *loci* en reserva de cruzamiento. La cola ejerce su efecto al interaccionar (*flechas interrumpidas*) con la proteína Sir 3, perteneciente a uno de los varios grupos de proteínas Sir (*gris*) que ayudan, a las secuencias silenciadoras de ADN situadas en ambos extremos de los *loci* (*bandas blancas*), a reprimir los genes dentro de esas regiones.

ADN en torno al núcleo de la partícula. Bradford B. Baer y Daniela Rhodes, del Laboratorio de Investigaciones Médicas en Biología Molecular, han visto también que los nucleosomas deplecionados de sus dímeros H2A-H2B son menos eficaces que los nucleosomas intactos cuando se trata de bloquear la transcripción. A mayor abundamiento, Vaughn Jackson y Roger Chalkley, de la Universidad de Iowa, señalan que las histonas H2A y H2B pueden disociarse fácilmente del tetrámero y transferirse de un nucleosoma a otro.

Toda esa gavilla de pruebas vienen a indicar que, cuando las proteínas activadoras, o las accesorias de éstas, se unen a un lugar específico de la cola, puede inducirse un cambio conformacional en la histona. Este cambio puede llevar a la separación temporal de las histonas H2A y H2B del nucleosoma. El desplazamiento de los dímeros podría, a su vez, desenrollar parte del ADN del nucleosoma y quedar al alcance de los factores basales. Después del paso de la ARN polimerasa, los dímeros H2A-H2B podrían reasociarse de nuevo con los tetrámeros H3-H4, con la consiguiente reaparición de los nucleosomas detrás de la polimerasa.

Nos sorprendió bastante ver que, al examinar las propiedades de los diferentes segmentos de la cola de la histona H4, éstos tenían a veces responsabilidades antagónicas. Así, mientras ciertos aminoácidos entre los números 4 y 23 se necesitan para la transcripción de varios genes, una parte de la cola participa en la represión de otros genes.





4. EL MODELO EXPANDIDO DE LA ACTIVACION DEL GEN defiende la intervención de las histonas en el proceso de transcripción que se desarrolla en las células. El modelo propone que, para que comience la transcripción, las proteínas activadoras (*violeta en 1a*) deben interaccionar directa o indirectamente (*flecha segmentada*) con la cola de la histona H4 en la caja *TATA* (*cinta delgada que emerge del núcleo de la partícula verde*). La interacción conduce a la disgregación parcial de la partícula nuclear por la razón verosímil de que se suelten H2A y H2B (*pequeños fragmentos verdes en 1b*). La disgregación conduce al ligamiento de la caja *TATA* a factores basales (*complejo rojo*) y a un nivel bajo de transcripción. El nivel máximo de transcripción se conseguiría de manera parecida a como lo sugiere el modelo del ADN desnudo para la activación del gen (*2*).

Paul S. Kayne, alumno de doctorado de mi laboratorio, ha identificado una importante función inhibidora de la cola de la histona H4: ayuda a reprimir los *loci* de cruzamiento en reserva. Las levaduras de cerveza poseen dos de estas regiones genéticas, que deben permanecer perpetuamente en silencio, ya que las células en las que se encuentran activas se tornan incapacitadas para el cruzamiento, es decir, de fundirse entre sí. Las células se cruzan cuando están en el estado haploide, aportando su juego de cromosomas. La fusión de dos células haploides engendra una célula diploide, algo semejante a lo que ocurre con la unión de un espermatozoo y un óvulo que produce un embrión diploide, portador de su propia dotación de cromosomas, en la que están representadas tanto la aportación paterna como la materna.

Kayne demostró que la deleción de los aminoácidos 15 a 19 de la cola de la histona H4 debilitaba grandemente la capacidad de apareamiento de las levaduras. La causa de ello yacía en la activación génica de regiones antes reprimidas. En nuestro laboratorio, y también en los de M. Mitchell Smith, de la Universidad de Virginia, y de Jack Szostak, de la Universidad de Harvard, se ha visto que basta la deleción de un aminoácido de las posiciones 16 a 19 para que se produzca un efecto semejante. Así pues, la presencia de todo el conjunto de esos aminoácidos constituye una condición necesaria para mantener reprimidos los *loci* de cruzamiento en reserva.

Lianna M. Johnson ha demostrado que la mayoría de los aminoácidos entre las posiciones 21 y 29 constituyen un requisito adicional para reprimir los mismos genes. Asimismo, ha comprobado que la sustitución de uno de dos aminoácidos presentes en la proteína Sir 3 puede contrarrestar el déficit de la capacidad de cruzamiento inducida por la mutación en H4. El cambio en la proteína Sir promovió la represión de los *loci* de cruzamiento en reserva y la estimulación del cruzamiento. El hecho de que un defecto en la histona H4 quede contrarrestado por un defecto en la proteína Sir apoya la idea de que la histona H4 y la proteína Sir intervienen de manera rutinaria en la represión de los *loci* de cruzamiento en reserva.

Los *loci* de cruzamiento en reserva residen cerca de los extremos, o te-

lómeros, del cromosoma III de la levadura. Para Daniel E. Gottschling, de la Universidad de Chicago, las colas de la histona 4 están implicadas también en la represión de otros genes vecinos de los telómeros de la levadura. El grupo de Gottschling descubrió un fenómeno sorprendente: de las mutaciones de la H4 que levantan la represión de los *loci* de cruzamiento en reserva, algunas vencen la represión de genes insertados artificialmente en regiones próximas a los telómeros. Ocurre lo mismo con la carencia de proteínas Sir. En resumidas cuentas, los genes que residen cerca de los telómeros quedan maniatados como si se tratara de los *loci* de cruzamiento en reserva.

Además de revelar nuevos detalles sobre el funcionamiento de las histonas, el análisis del cruzamiento ha dejado en nuestra mano una poderosa herramienta para el estudio de las histonas. Un haz de defectos genéticos, que responde al nombre colectivo de mutaciones *swi* (del inglés "switch", interruptor), bloquean la activación del gen de la levadura que codifica cierta enzima esencial para la determinación del tipo "sexual". (La levadura puede corresponder al tipo **a** o al tipo alfa.) Ira Herskowitz, de la Universidad de California en San Francisco, ha observado la existencia de otras mutaciones (las *sin*) que anulan ese bloqueo; hay una mutación de éstas en el gen de la histona H3, señal de que la región alterada de la histona H3 puede influir sobre la actividad del gen. El descubrimiento de otras mutaciones *sin* acabará indicando posiblemente la existencia de segmentos reguladores adicionales de los genes de las histonas. Esas mutaciones contribuirán, sin duda, a identificar las proteínas que controlan genes mediante su influjo en las histonas.

En esa misma onda, se ha observado en el laboratorio de Winston que los efectos de las mutaciones *snf*, generadas por Marian Carlson, de la Universidad de Columbia, son muy parecidos a los producidos por las mutaciones *swi*. Las proteínas determinadas por las versiones normales de los genes mutados podrían facilitar la liberación de los nucleosomas y, con ello, quitar las trabas para la transcripción. El esclarecimiento y análisis de las mutaciones *swi*, *snf* y otras que afecten a la estructura de la cromatina se han convertido en objetivos prioritarios de la investigación en regulación génica.

Por ser la histona H3 semejante a la histona H4 en muchos aspectos (incluido su patrón de acetilación y su papel en la formación y estabilización de los nucleosomas), es razonable esperar que la cola de la histona H3 controle genes a la manera de la cola de la histona H4. Podría, por ejemplo, predecirse que la cola de la histona H3 participe en la supresión de los *loci* del apareamiento silencioso. Pero no lo hace. Más aún, Randall K. Mann ha mostrado que se requiere la cola de la histona H3 para la represión de muchos de los genes que, para activarse, necesitan la cola de la histona H4.

Para explicar por qué las histonas H3 y H4 desempeñan esas funciones dispares, es obligado conocer mejor la interacción entre dichas moléculas y otras proteínas, así como entre aquéllas y el ADN. No se ha determinado aún la función celular de las histonas H2A y H2B, aunque sepamos que no se comportan igual que las histonas H3 y H4.

Buena parte de cuanto se conoce a propósito de la regulación génica por las histonas procede de los estudios realizados con levaduras. En éstas, las secuencias activadoras curso arriba de ADN permanecen, tal parece, exentas de nucleosomas. En las células humanas, una fracción notable de la cromatina se encuentra en la conformación de 30 nanómetros. Ello significa que, durante el desarrollo de las células humanas, podría reclamarse la activación de algunos genes cuyas secuencias activadoras curso arriba del ADN, o intensificadoras, están incluidas en los nucleosomas. ¿Cómo se las arreglan?

Apoyándonos en los descubrimientos de Helen M. Blau, de la Universidad de Stanford, podríamos, con lógica, responder que ciertas proteínas (tal vez distintas de los activadores) logran desplazar de los intensificadores a los nucleosomas. Cabe también que los genes que la célula humana ha de activar en un momento y silenciar en otro (como ocurre con la mayoría de los genes de la levadura) porten intensificadores que persistan en estado de alerta, prestos a intervenir, exentos de nucleosomas.

Hay que trabajar duro todavía antes de dominar los mecanismos de acción celular de las histonas, trátese de levaduras o de otros organismos. Sabemos ya lo suficiente para abjurar del viejo dogma que atribuía a la partícula nuclear de histonas un papel de bobina pasiva. Hemos probado, con otros autores, que las tales partículas están capacitadas para activar y para reprimir genes. Las distintas histonas, así como los dominios específicos dentro de sus moléculas, dan cuenta de sus efectos. Y acariciamos la idea de que ciertas proteínas reguladoras que colaboran con los activadores controlen los genes al unirse específicamente al ADN y a ciertos dominios críticos de las histonas.

Nos toca ahora recoger otro guante: descifrar las funciones que la naturaleza ha asignado a los pequeños segmentos del interior de los dominios histónicos e identificar qué proteínas interaccionan con tales segmentos. Muchos investigadores, cuya inspiración permanecía aletargada al enfrentarse con las histonas, están hoy volcados de lleno a ese esfuerzo. La exploración de la estructura de la cromatina se ha convertido de repente en una nueva frontera, sugerente y atractiva, del estudio de la regulación génica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NUCLEOSOME LOSS ACTIVATES YEAST DOWNSTREAM PROMOTERS IN VIVO. Min Han y Michael Grunstein en *Cell*, vol. 55, págs. 1137-1145; 23 de diciembre de 1988.

YEAST HISTONE H4 N-TERMINAL SEQUENCE IS REQUIRED FOR PROMOTER ACTIVATION IN VIVO. Linda K. Durrin, Randall K. Mann, Paul S. Kayne y Michael Grunstein en *Cell*, vol. 65, págs. 1023-1031; 14 de junio de 1991.

CHROMATIN AS AN ESSENTIAL PART OF THE TRANSCRIPTIONAL MECHANISM. Gary Felsenfeld en *Nature*, vol. 355, n.º 6357, págs. 219-223; 16 de enero de 1992.

ERRATA

En "Procedencia de las ilustraciones" de la página de créditos del número de octubre,

DONDE DICE

75-80 Le Scienze

DEBE DECIR

75-79 "Le prime piante americane negli erbari del Cinquecento", de Sergio Toresella. *Le Scienze*, enero de 1992.

80 Instituto Botánico de Barcelona

En el número de noviembre, corríjase, asimismo, en la página 105, segunda columna, "influencia de una hormona..." por "influencia de una neurona..."

Orugas canoras, hormigas y simbiosis

Con cantos de sirena y señuelos químicos, ciertas orugas de mariposas atraen a las hormigas para que éstas les sirvan de guardianes; hormigas que, a su vez, suelen estar implicadas en relaciones de simbiosis con otros insectos y plantas

Philip J. DeVries

Lo sabe cualquier aficionado a la comida campestre. Si por casualidad se sienta sobre un hormiguero, no estará tranquilo: las hormigas defienden vigorosamente la comida que encuentran y disuaden a las especies que pretenden hollar su territorio (sean o no humanas). Pero algunos insectos, entre ellos toda una cohorte de orugas de mariposas, no sólo pueden adentrarse en sus dominios, sino que, además, establecen asociaciones de mutuo beneficio con las hormigas. Se trata de ejemplos llamativos de simbiosis, como se denomina el fenómeno en que dos o más especies viven en estrecha interacción. Al ofrecer indicaciones muy valiosas para entender las complejas relaciones entre múltiples especies, las simbiosis revisten particular interés para los ecólogos evolutivos, que se preocupan de conocer el modo y la causa a través de los cuales los organismos han adquirido sus rasgos y comportamientos característicos.

La capacidad de formar simbiosis con las hormigas y de explotar su talante belicoso era cosa sabida en dos grupos principales de organismos: las plantas y los insectos herbívoros de los órdenes Homópteros (áfidos, cigarras e insectos afines) y Lepidópteros (mariposas y polillas). En todos ellos, la presentación de comida en forma de secreciones gustosas resulta decisiva, así parece, para mantener la asociación con las hormigas. Las plantas proporcionan secreciones a través de nectarios extraflorales de sus hojas; las hormigas, atraídas, defienden las plantas contra los insectos fitófagos. De manera similar, los insectos ofrecen secreciones, emitidas por ciertos órganos, a las hormigas; éstas acuden al reclamo de la ligamaza (si de áfidos hablamos) para proteger de sus depredadores a quienes se la suministran.

La mirmecofilia, la capacidad de asociarse simbióticamente con hormigas, ha evolucionado en sólo dos familias de mariposas: los Licénidos (donde se inscriben nuestros mantos, niñas y azules, que se encuentran extendidos por todo el mundo) y los Riodínidos (o metálicas, que habitan, de manera casi exclusiva, en los trópicos americanos). Estas dos familias constituyen el grupo de lepidópteros licenoideos. Los licenoideos, que suelen pasar inadvertidos (su envergadura alar no alcanza los cinco centímetros), abarcan el 40 por ciento de las más de 13.500 especies conocidas de mariposas diurnas; se visten, además, con una sorprendente riqueza de colores y dibujos. Por placentera que resulte la contemplación de estas mariposas adultas, son, sin embargo, sus orugas las que despiertan la admiración de los biólogos evolutivos; muchas presentan órganos especializados que intervienen en sus simbiosis con las hormigas.

Durante los últimos 20 años, ha ido saliendo a la luz esa relación gracias a los trabajos de Christopher B. Cottrell (del Consejo de Investigación del Tabaco, de Zimbabwe), Konrad Fiedler (de la Universidad de Maximiliano en Würzburg), Ulrich Maschwitz (de la Universidad Goethe en Frankfurt del Main), Naomi E. Pierce (de la Universidad de Harvard) y Jeremy A. Thomas (del Instituto de Ecología Terrestre, de Inglaterra), quienes han estudiado distintos miembros de la familia Licénidos. En sus conclusiones han demostrado que las simbiosis entre orugas de licénidos y hormigas pueden ir desde la simbiosis de mutualismo, en la que ambas especies se benefician, hasta la simbiosis de parasitismo, en que una de ellas se aprovecha a expensas de la otra. En algunos casos, las simbiosis conducen a complicados ciclos biológicos para una o ambas especies.

Hasta hace poco, el único trabajo pormenorizado sobre simbiosis entre las orugas de riodínidos y las hormigas era el realizado, veintitantos años atrás, por Gary N. Ross, de la Universidad de Louisiana en Baton Rouge. Y así, durante mucho tiempo, cuanto sabíamos sobre evolución y ecología de las simbiosis entre mariposa y hormiga se basaba, casi por entero, en estudios de la familia Licénidos. Pero la inquisición reciente sobre las orugas de la familia Riodínidos, en la que, con otros, he tenido algo que ver, ha aportado información comparada que permite reinterpretar la evolución y las consecuencias de las asociaciones simbióticas con hormigas. Con este nuevo cuerpo de conocimientos ha llegado una nueva apreciación del papel ecológico fundamental que al-

PHILIP J. DEVRIES es experto en especial en las interacciones entre plantas y animales. Desarrolla su actividad profesional a caballo entre la Universidad de Texas en Austin y el centro de biología de la conservación adscrito a la Universidad de Stanford.

1. ASOCIACION SIMBIOTICA entre oruga y hormigas. De esa relación sacan provecho las dos especies. Adaptaciones varias, como el canto de atracción o señales acústicas, permiten a la oruga explotar la territorialidad y los instintos de recolección de alimento de las hormigas. La oruga está sorbiendo líquido dulce de un nectario extrafloral de una planta, mientras las hormigas la asisten.

gunas especies de hormigas desempeñan.

Mi interés por las interacciones entre orugas y hormigas empezó hace algunos años en Brunei, Borneo, cuando observé el primer lazo entre éstas y una mariposa licenoidea. Me dedicaba, por aquel entonces, a otros aspectos de la biología de las mariposas, pero ese encuentro casual avivó mi fascinación por las orugas mirmecófilas, hasta el extremo de haber consagrado los últimos siete años a la exploración de las simbiosis entre las hormigas y las orugas de mariposas riodínidas de América Central y del Sur.

La mariposa riodínida que he estudiado con un mayor detalle ha sido *Thisbe irenea*. Vive en varios hábitats de selva tropical entre México y Brasil y puede considerarse arquetipo de las orugas riodínidas que forman simbiosis con hormigas. La hembra de *Thisbe* deposita los huevos, uno a uno, en árboles jóvenes del género *Croton*; una vez han emergido, las orugas se alimentan del árbol. Las hormigas acuden a *Croton* atraídas por el nectario extrafloral que existe en la base de cada hoja. (Esos nectarios menudean en muchas plantas tropicales.) Con las hormigas que patrullan por los árboles formarán simbiosis las orugas.

Cuando empecé mi estudio de *Thisbe* en la isla de Barro Colorado, todo lo que se sabía de las orugas era su alimentación de *Croton* y su asociación con hormigas. El primer paso lógico era comprobar qué les pasaría a las orugas sin las hormigas. Eliminé, por tanto, a todos los insectos de varias poblaciones de arbolillos de *Croton* y después unté la base de cada uno con una resina pegajosa; con ello impediría que ningún insecto marchador, las hormigas lo son, accediera a los árboles, pero no obstruiría que las hembras de mariposas pusieran allí sus huevos. Y en la mitad de los árboles coloqué un palito que hiciera de puente sobre la resina y facilitara así el retorno de las hormigas.

Durante los 10 meses siguientes realicé un censo semanal de hormigas y orugas en cada árbol. Los resultados demostraron que los árboles que tenían hormigas acumularon más orugas que los árboles de los que habían quedado excluidas. La explicación plausible era que, en las plantas sin hormigas, los depredadores alados estaban eliminando a las orugas.

De los depredadores naturales que acosan a las orugas, las avispas sociales ocupan un lugar destacado, sobre todo en los trópicos. Las avispas sociales gastan buena parte de su vida adulta buscando orugas entre la vegetación, y cuando una hembra da con una, la mata con su aguijón, corta el cuerpo y vuelve con la carne a su nido para dar de comer a las hambrientas larvas de avispa.

Para comprobar si las hormigas protegían a las orugas de las avispas, coloqué dos plantas en maceta allí donde abundaban los nidos de avispa. Dejé que las hormigas se instalaran en una planta. Coloqué, luego, una oruga en cada planta y cronometré cuánto tiempo sobrevivía. Al final se demostró que, en ausencia de hormigas, las orugas no duraban mucho en las plantas; lo habitual era que, a los pocos minutos, las avispas mataran a las orugas y se las llevaran. Pero si había hormigas, éstas defendían tenazmente a las orugas contra los ataques de las avispas. En conclusión, pues, la depredación por avispas explicaba la caída del número de orugas en las plantas exentas de hormigas.

Estos sencillos experimentos revelaron el valioso servicio que las hormigas prestan a las orugas de *Thisbe*, protegiéndolas de los depredadores. Pero levantaba, al propio tiempo, un nuevo interrogante sobre la simbiosis: ¿qué ganaban las hormigas a cambio de sus esfuerzos? O, dicho de otro modo, ¿cómo se las ingenian las orugas para lograr que las hormigas se comprometan en una defensa arriesgada de un organismo que no pertenece a su colonia?

La respuesta descansa, en parte, en





2. *THISBE IRENEA* es una de las muchas mariposas que, siendo oruga, establece una simbiosis con las hormigas. La mirmecofilia, "el amor a las hormigas", ha evolucionado en sólo dos familias de mariposas, los Riodínidos y los Licénidos.

una serie de órganos especializados de la mariposa en ciernes. Las hormigas suelen ignorar a las jóvenes orugas de *Thisbe* que se encuentran en su primera o segunda fase, o estadio de desarrollo. Sólo al mudar y entrar en su tercer estadio, las orugas sufren un espectacular cambio morfológico que las hace muy atractivas; a partir de entonces, las hormigas las atienden constantemente hasta que empiezan su metamorfosis en mariposas.

Las orugas en sus fases tercera y posteriores tienen tres conjuntos de los llamados órganos de hormigas, cruciales para mantener las actividades de asistencia que éstas realizan. Destacan un par de glándulas evaginables, los órganos nectarios: situados en los segmentos posteriores de la oruga, recuerdan los dedos de un guante de cirujano. Cuando una hormiga golpea con sus antenas la zona posterior de una oruga, esos órganos se evaginan del cuerpo y segregan una gota de fluido claro en su punta, líquido que la hormiga bebe con avidez; tras lo cual, se retraen hacia el interior del cuerpo. Las hormigas, sin embargo, quedan tan cautivadas por la secreción que golpean sin cesar a la oruga solicitando más. Según mis cálculos, las hormigas que atienden a una oruga de *Thisbe* demandan esa secreción, al menos, una vez por minuto.

Las hormigas, que obtienen también secreciones de los nectarios extraflorales de los árboles de *Croton*, prefieren asistir a las orugas que a los nectarios cercanos de la planta. Junto con la malograda Irene Baker, de la Universidad de California en Berkeley, descubrí que las secreciones de las orugas diferían de las ofrecidas por las plantas de *Croton*. Dicho en términos gastronómicos, la secreción de las orugas es *haute cuisine*. El néctar extrafloral es una mezcla al 33 por ciento de varios azúcares, en tanto que la secreción de la oruga, carente prácticamente de azúcares detectables, posee concentraciones mucho más elevadas de aminoácidos. Las hormigas reciben de las orugas una pitanza que resulta mucho más nutritiva que la que les proporcionan los nectarios de las plantas, aunque no sea tan dulce.

A las orugas de *Thisbe*, sin embargo, les encanta el néctar extrafloral. Cuando no están comiendo las hojas o andando sobre la planta de *Croton*, reposan con la cabeza sobre los nectarios extraflorales. Una serie de experimentos, en los que se criaron unas con acceso al néctar extrafloral y otras sin dicha posibilidad, demostró que bebían el néctar, y las que pudieron tomarlo crecían más rápidamente que las privadas del mismo. El néctar extrafloral contribuye, junto con el otro tejido foliar que sirve de alimento, a su tasa de desarrollo.

Beber néctar extrafloral parece ser práctica muy extendida entre las orugas riodínidas que forman simbiosis con las hormigas. Las orugas mirmecófilas suelen alimentarse de plantas que poseen nectarios extraflorales. Y a la inversa, las especies de orugas que no forman simbiosis con hormigas se alimentan con más frecuencia de plantas que carecen de nectarios. Al reclutar las hormigas guardianas de la planta para su propia protección y alimentarse de los tejidos de las hojas tiernas, las orugas de mariposas riodínidas explotan la simbiosis planta-hormiga.

Los estudios de los órganos nectarios resolvieron sólo parte del misterio que celaba la simbiosis entre la oruga y la hormiga. Las hormigas son autómatas abnegados que proporcionan alimento, defensa y cuidado de la prole a la colonia; pero hay algunas que permanecen con las orugas de *Thisbe* durante una semana o más. ¿Por qué invierten su tiempo protegiendo a elementos de una especie distinta, en vez de retornar prestas a su nido con la secreción de la oruga, como harían con el néctar de la planta u otras exquisiteces?

Con esa cuestión tienen que ver otros órganos de las hormigas presentes en las orugas. Las de *Thisbe* y otras especies de riodínidos poseen un par de órganos tentaculares, glándulas terminadas en un penacho y situadas detrás de la cabeza, que parecen ejercer una influencia química sobre el comportamiento de las hormigas. Cuando estos órganos emergen del cuerpo, las hormigas asistentes que merodean por los alrededores adquieren de repente una postura defensiva, con las mandíbulas abiertas y el abdomen arrollado bajo el cuerpo. Según vi, bastaba entonces que un palillo se moviera u ondeara un hilillo al lado de la oruga para que las hormigas se lanzaran a un ataque agresivo: mordían el objeto y querían aguijonearlo.

Lo observado en *Thisbe* y otras especies de riodínidos da a entender que los órganos tentaculares de la oruga descargan alguna sustancia química similar a una feromona de alarma de las hormigas, una sustancia que éstas emplean para avisar de un ataque contra la colonia. Ignoramos todavía la naturaleza química de las emisiones de los órganos tentaculares; nada podemos afirmar, pues, sobre su grado de similaridad con las feromonas de alarma reales de las hormigas. Sí resulta palmario

que estos órganos cumplen la misión de reclamar la atención de las hormigas para que se vuelquen hacia la protección de las orugas.

En 1926, Carlos T. Bruch, entomólogo del Museo Nacional de Historia Natural de Argentina, descubrió un tercer tipo de órgano de las hormigas. A él le debemos la primera descripción de una especie de riodínido mirmecófilo encontrada en Argentina. Además de los conocidos órganos nectarios y tentaculares evaginables, presentaba un par de apéndices minúsculos, móviles, parecidos a bastoncillos, que surgían de la parte anterior del primer segmento torácico y se prolongaban sobre la cabeza. No se sabía entonces de ninguna otra oruga que portase esos apéndices.

Cuarenta años después, en México, Ross halló unos apéndices similares en otra especie de riodínido; los llamó papilas vibratorias y sugirió que su movimiento podría transmitir vibraciones a las hormigas. Está ya demostrado que la mayoría de las orugas de riodínidos mirmecófilos poseen papilas vibratorias, en paralelo con las hormigas.

Comprobé que las papilas vibratorias de las orugas de *Thisbe* funcionaban a la manera explicada por Bruch y Ross. Pero advertí también que, mientras las papilas vibratorias estaban en movimiento, las orugas movían su cabeza hacia delante y hacia atrás. Me sorprendió la semejanza de estos movimientos cefálicos con los de los escarabajos longicornios, que producen un sonido audible cuando mueven su cabeza hacia delante y hacia atrás. (Los depredadores sueltan, parece, a los escarabajos chirriantes.) Aunque mis oídos no percibían rumor alguno procedente de las orugas *Thisbe*, estaba convencido de que sí estaban emitiendo sonidos.

Se me empezó a hacer la luz en la Universidad de Texas en Austin, cuando examiné las estructuras en un microscopio electrónico de barrido. A grandes aumentos, las papilas vibratorias mostraban unos anillos concéntricos, nítidos, en torno a su eje. La parte superior de la cabeza, que las papilas rozaban en su vibración, presentaba pequeñas protuberancias o granulaciones a modo de plectros de guitarra. Si mirábamos juntas las micrografías, las correspondientes a las papilas vibratorias y las relativas a la cabeza, parecía que estuviéramos viendo un güiro, un instrumento hispanoamericano de percusión que se toca haciendo deslizar un palo de madera por los surcos de una calabaza tallada. En resumen, pues, lo mismo la morfología que la conducta de la oruga abonaban la idea de que papilas y cabeza funcionaban al unísono como un instrumento sonoro.

Nadie, hasta entonces, había hablado de que las orugas emitieran sonidos. Debía demostrar esa idea "descabellada". Volví a Panamá con un micrófono y un amplificador de refinada sensibilidad. Ya el mismo día de mi arribada, comprobé que los instrumentos me permitían, efectivamente, oír y registrar las llamadas de las orugas. Sus cantos de baja amplitud sólo eran audibles cuando el micrófono tocaba su cuerpo o la superficie sobre la que se deslizaba. Ello significaba que las llamadas se propagan a través del sustrato sólido y no a través del aire, y daba así explicación a que ningún naturalista hubiera percibido nunca las emisiones sonoras de las orugas.

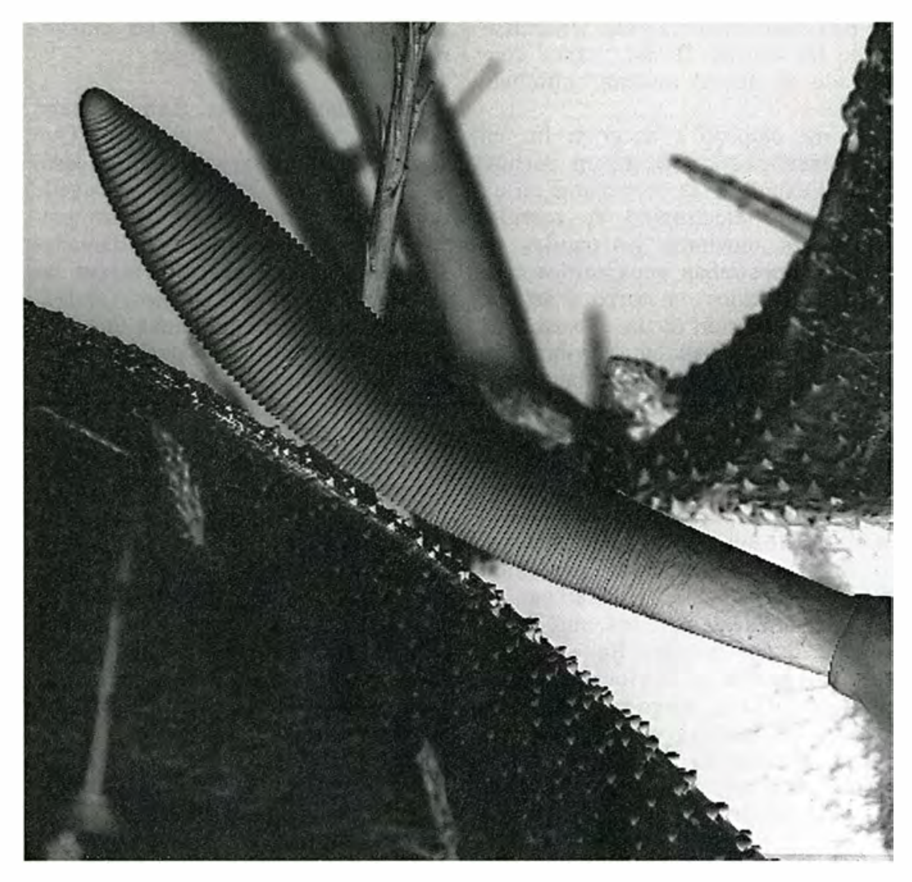
Grabé las llamadas. Eliminé luego sus papilas vibratorias. ¿Qué descubrí? Nada menos que las orugas pueden cantar mientras les quede una papila. Los análisis de las grabaciones revelaron que las llamadas eran intensas si poseían enteras las dos papilas, y, más débiles (casi la mitad), cuando se eliminaba una. Las orugas desprovistas de papilas vibratorias enmudecían, por más que continuaran moviendo la cabeza. Ahora bien, las papilas se reemplazan en cada muda de piel; por consiguiente, las orugas silenciosas recuperaban su "voz" cuando mudaban en la siguiente fase. (Este fenómeno resultó especialmente útil para los fines de la experimentación, habida cuenta de que podía trabajar varias veces con la misma oruga, que me servía, además, de control.) Esa gavilla de pruebas desembocaba en la conclusión siguiente: las papilas vibratorias, las granulaciones cefálicas y los movimientos de la cabeza actuaban en concierto (literalmente) como componentes de un sistema de producción de canto.

La facultad de poder enmudecer a las orugas me allanó el camino para entrar en la función que el canto cumple en su asociación con las hormigas. Introduje orugas mudas y canoras en la misma planta; conté cuántas hormigas las asistían durante cierto tiempo. Los resultados me evidenciaron que los cantos retenían a las hormigas en la vecindad de las orugas: las canoras se rodearon de muchísimas más hormigas. Y es inmediato sospechar que, por esa misma razón numérica, también gozaran





3. COMPORTAMIENTO SIMBIOTICO de las hormigas, que está mediado por órganos especializados de éstas y que poseen las orugas mirmecófilas. En su extremo posterior, las orugas presentan unas glándulas de néctar evaginables, que segregan un fluido recibido con placer por las hormigas (*izquierda*). En su extremo anterior, las orugas desarrollan unos órganos tentaculares, que liberan una sustancia química semejante a una señal de alarma de las hormigas. Las hormigas asumen inmediatamente una postura defensiva (*derecha*) y protegerán a la oruga de sus depredadores, como las avispas.





4. PAPILAS VIBRADORAS; se extienden sobre la cabeza de la oruga desde el primer segmento torácico. Con ellas, el insecto emite una llamada acústica que atrae a las hormigas. Cada papila es un bastoncito cubierto de surcos concéntricos. Cuando la oruga mueve su cabeza hacia adelante y hacia atrás, las granulaciones o protuberancias microscópicas que hay en la misma se deslizan a través de los surcos y producen vibraciones (*izquierda*). En forma y función, las papilas vibradoras y las granulaciones de la cabeza se parecen a un güiro (*arriba*).

de mayor protección contra los depredadores que sus compañeras silenciosas.

Si el estímulo químico de los órganos tentaculares parece imitar la señal de una feromona entre las hormigas, los cantos de las orugas copian, diríase, las comunicaciones auditivas de las hormigas, al menos en algunos respectos. Cuando éstas hallan una fuente de alimento o están en situación de alarma, producen vibraciones que se transmiten a través del sustrato donde se encuentran y atraen a sus compañeras de hormiguero. Hay muchas que provocan las vibraciones golpeando el abdomen sobre el sustrato, pero otras hormigas poseen órganos emisores de sonido bien desarrollados. Los cantos de las hormigas y de las orugas tienen aproximadamente las mismas frecuencias y ritmos de pulsación.

Estas semejanzas sugieren que la habilidad canora de las orugas y las características del propio canto evolucionaron mediante selección natural instada por las hormigas. En otras palabras, las hormigas determinaron qué orugas sobrevivirían al ignorar las llamadas extrañas y responder a los cantos parecidos a los suyos propios.

Comportamiento éste que no deja de resultar sorprendente, por cuanto viola el principio confesado por los naturalistas a propósito de los sistemas de comunicación de los insectos: el canto ha ido evolucionando en respuesta a la selección directa de rasgos sexuales o defensivos. A modo de botón de muestra: el chicharreo de un grillo macho invita a las parejas en potencia y avisa a otros machos que se alejen de su territorio; los machos vigorosos proliferan más deprisa que sus hermanos perezosos porque sus cantos atraen a un mayor número de hembras receptivas; la capacidad canora de los grillos y las características de su canto han evolucionado así directamente en respuesta a la selección por parte de las hembras de la misma especie.

Sin embargo, en las simbiosis entre oruga y hormiga las llamadas producidas por una especie han evolucionado en respuesta a la selección instada por otra especie con la que no guarda relación de parentesco. La evolución de las orugas ha sido guiada por la selección que actúa sobre peculiaridades completamente distintas de las hormigas. Gracias a lo cual, el sistema oruga-hormiga nos ofrece un nuevo banco de pruebas para estudiar la comunicación de los insectos, en particular en el caso de las especies que forman simbiosis con las hormigas.

Las simbiosis oruga-hormiga son facultativas, no obligadas; es decir, las dos especies se benefician mutuamente, si bien ninguna depende absolutamente de la otra para su supervivencia. El grado de implicación de las especies en la simbiosis varía mucho; de acuerdo con el hábitat y el lugar, una misma especie de oruga puede asociarse con varias de hormigas. Así, dentro de su área de distribución geográfica, podemos hallar las orugas de *Thisbe* relacionadas con una especie de hormiga en Costa Rica y con otra especie en Belize. Incluso dentro de un mismo bosque, distintas especies de hormigas suelen asistir a las orugas en los distintos hábitats.

Tamaña flexibilidad me indujo a pensar que los cantos de las orugas no atraían a sólo determinadas especies de hormigas. Antes bien, deberían ser señales de reclamo general, a las que muchas especies podrían responder. Para confirmar mi sospecha, necesitaba investigar los cantos de orugas implicadas en simbiosis obligadas, específicas de especie.

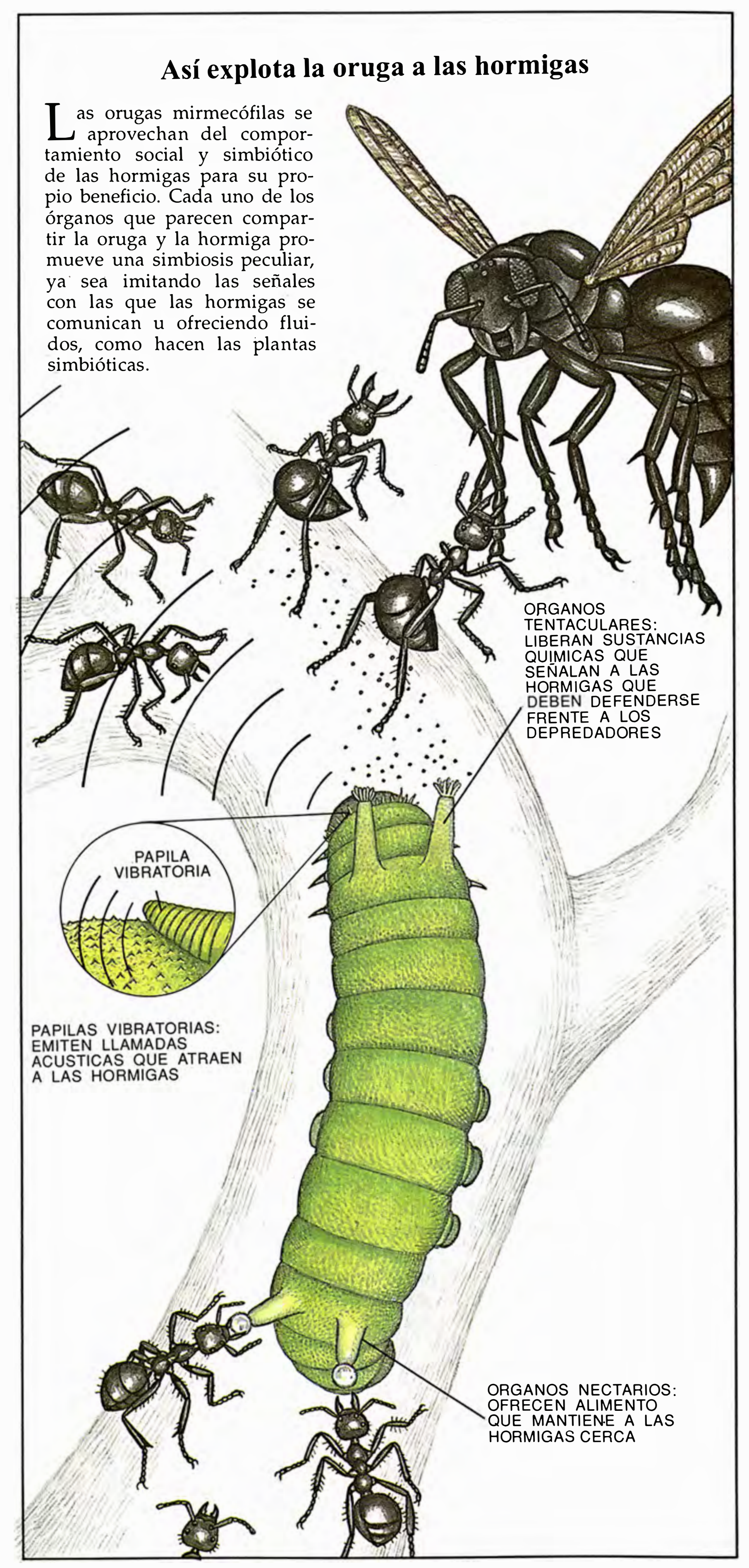
Los casos mejor documentados de simbiosis obligadas oruga-hormiga nos llevan al género europeo de licénidos *Maculinea*, que tiene orugas parásitas de ciertas especies del género *Myrmica*. Los trabajos de Thomas y sus colaboradores en Europa

han sacado a la luz un mundo sorprendentemente complejo de ciclos biológicos de *Maculinea.* Describiré sólo una parte. Cuando estas orugas alcanzan su tercer estadio, caen de la planta que les ha servido de alimento y son recogidas por una hormiga *Myrmica.* Transportada al hormiguero, se torna allí carnívora y come larvas de hormiga. Aunque cualquier especie de *Myrmica* llevará a su hormiguero a cualquier especie de oruga de *Maculinea*, cada especie de hormiga sólo permite que una sola especie de oruga complete su ciclo biológico dentro del hormiguero, y no dejarán de matar a cualquier otra especie de oruga depredadora. Así las cosas, la presión de selección sobre las orugas de *Maculinea* para que formen simbiosis con la especie apropiada de *Myrmica* es fortísima.

¿Guardaban los cantos de estas orugas un parecido con los de sus patrones específicos mayor que con los de otras hormigas? En colaboración con Thomas y Reginald B. Cocroft, de la Universidad de Cornell, registré y analicé los cantos producidos por varias orugas de *Maculinea* y varias hormigas *Myrmica.* Cada especie de oruga y de hormiga producían llamadas distintivas, pero no descubrimos indicios de que los cantos de las orugas hubieran evolucionado para parecerse a los de las hormigas que eran sus patrones obligados.

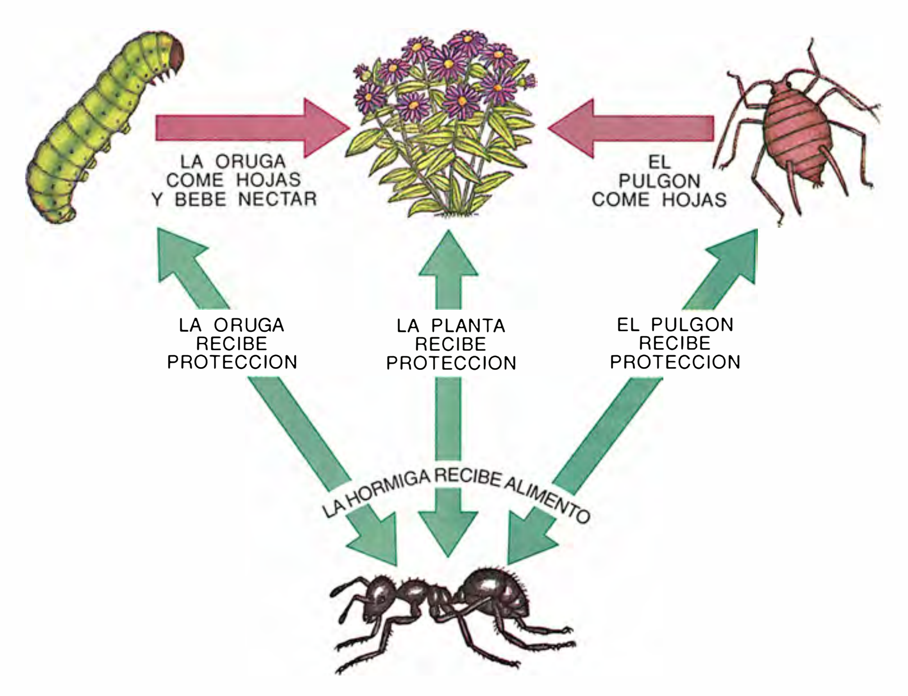
Antes bien, nuestras observaciones refuerzan la idea de que los cantos atraen a las hormigas en general, no a una especie en particular. Una vez las hormigas están de servicio, el reclamo sonoro sirve, junto con otros órganos de hormigas, para mantener una guardia constante de éstas. A buen seguro, las señales químicas revisten, en los sistemas *Maculinea-Myrmica*, una importancia mayor para gobernar las simbiosis específicas de especie.

La singularidad de tales simbiosis despertó mi curiosidad por saber de qué modo estas estructuras y el fenómeno de la mirmecofilia evolucionaron en las orugas. De los miles de mariposas y polillas que integran el orden Lepidópteros, no se conoce la existencia de las simbiosis aquí descritas fuera de los licenoideos. Riodínidos y Licénidos presentan muchos paralelismos en su biología. Las orugas mirmecófilas de las dos familias producen secreciones alimentarias, señales químicas y llamadas acústicas. Por el contrario, las especies no mirmecófilas carecen de todos o algunos de estos comporta-



Así explota la oruga a las hormigas

Las orugas mirmecófilas se aprovechan del comportamiento social y simbiótico de las hormigas para su propio beneficio. Cada uno de los órganos que parecen compartir la oruga y la hormiga promueve una simbiosis peculiar, ya sea imitando las señales con las que las hormigas se comunican u ofreciendo fluidos, como hacen las plantas simbióticas.



5. LAS SIMBIOSIS ENTRELAZADAS son comunes porque hay pocas especies de hormigas que asistan a otros organismos. En un hábitat determinado es probable que plantas, orugas y otros insectos (los pulgones, por ejemplo) establezcan simbiosis con la misma especie de hormiga. Resulta una paradoja de la naturaleza el hecho de que, por compartir hormigas simbióticas, estos mirmecófilos se alimenten de plantas protegidas de los insectos herbívoros por las mismas hormigas.

mientos y los órganos de hormigas asociados. Por ejemplo, son siempre mudas, aunque estén estrechamente emparentadas con las especies mirmecófilas, que emiten sonidos.

Tomadas en su conjunto, estas pautas parecen refutar una vieja hipótesis sobre la evolución de las simbiosis oruga-hormiga y apoyar otra nueva. Hace cuarenta años, en un artículo de revisión sobre los lepidópteros mirmecófilos, Howard E. Hinton, de la Universidad de Bristol, señaló tres puntos explícitos acerca de la historia evolutiva de estas especies: la mirmecofilia apareció por evolución una sola vez en las mariposas, la mirmecofilia es una característica primitiva que se ha mantenido desde aquel acontecimiento y, por último, la capacidad de establecer simbiosis con hormigas se ha perdido en algunas estirpes de riodínidos y licénidos.

De la comparación entre las orugas de riodínidos y licénidos, y entre las de estos dos tipos y las de otros lepidópteros, se deduce una historia evolutiva que difiere mucho de la que Hinton imaginaba. Aunque las orugas de riodínidos y de licénidos poseen órganos de hormigas que segregan alimento y señales químicas, aparecen en diferentes segmentos del cuerpo según el grupo. Las orugas de licénidos emiten cantos, aunque carecen de papilas vibratorias; desconocemos todavía los órganos de hormigas implicados en el canto. Se desprende de ello que los órganos de hormigas de los riodínidos y los licénidos son análogos, pero no homólogos: son similares, mas sin relación evolutiva entre sí. La morfología comparada por sí sola sugiere así que la mirmecofilia evolucionó al menos dos veces en las mariposas: una en los licénidos y otra en los riodínidos.

Además, los mecanismos específicos que intervienen en la simbiosis pueden haber surgido por evolución al menos tres veces. Las orugas del género de riodínido *Eurybia* emiten cantos y forman simbiosis con hormigas, pero, como los licénidos, tampoco poseen papilas vibratorias. Este hecho implica que la capacidad de las mariposas de producir cantos debió haber aparecido por evolución al menos dos veces tan sólo en las orugas de riodínidos.

Las especies no mirmecófilas nos instruyen también sobre la evolución de las simbiosis oruga-hormiga. La inmensa mayoría de las orugas de mariposas diurnas y nocturnas están erizadas de espinas o pelos, o exhiben comportamientos que mantienen alejadas a las hormigas. Las orugas de licenoideos que no se asocian con hormigas poseen, asimismo, largos pelos y carecen de órganos de hormigas. En su conjunto, las especies de riodínidos y de licénidos que no establecen simbiosis con las hormigas se parecen más a la mayoría de los lepidópteros que a sus propios primos mirmecófilos. Otro dato que abona la idea según la cual la mirmecofilia apareció en las mariposas licenoideas al menos dos veces, y que el rasgo surgió en época relativamente reciente.

Una mirada a las hormigas nos ayudará a entender mejor ciertos aspectos del desarrollo de las simbiosis. A pesar de su aparente semejanza externa, las especies de hormigas han alcanzado una alta adaptación distintiva; así, las hay que poseen el abdomen expandible para almacenar líquidos y pasan su vida colgadas en el nido a modo de cantimploras vivas; las hormigas legionarias, por su parte, se especializan en la caza y captura de determinados tipos de artrópodos; las hormigas cortadoras de hojas son expertas en rebanarlas para formar mantillo en sus jardines de hongos subterráneos. La tendencia a la especialización en las hormigas, archicorroborada, permite dividirlas en cuatro categorías generales según su dieta: depredadoras, carroñeras, granívoras y otras herbívoras, y recolectoras de secreciones.

La mayoría de los estudios sobre la evolución de la mirmecofilia han confinado las especies en el bando de las depredadoras de orugas o en el de las mutualistas potenciales. Mi experiencia me demuestra algo muy distinto: del centenar largo de especies de hormigas que habitan en mi campo panameño de trabajo, son contadas las que cuidan de las orugas o se las comen. Cuando ofrecí orugas de riodínidos y de licénidos a un batiburrillo de hormigas, unas especies, pocas, mataron a las orugas, otras, pocas también, las cuidaron, pero la mayoría optó por ignorarlas.

El elemento de unión entre las diversas especies de hormigas que asistían a las orugas era su ecología alimentaria. Invertían buena parte de su tiempo recolectando las secreciones emitidas por insectos del orden Homópteros y por los nectarios extraflorales de plantas, además de las producidas por las orugas de mariposas. El modelo local descubierto en Panamá resultó pronto extrapolable a una escala mucho mayor. En todo el mundo, no llegan al 10 por ciento los géneros de hormigas que se asocian con orugas; esa fracción minoritaria abarca también a cuantas asisten a otros insectos productores de secreciones y a plantas con nectarios

extraflorales. No entran en ese inventario ni las hormigas depredadoras generalistas, ni las depredadoras especialistas de artrópodos, ni las herbívoras y granívoras.

En resumen, independientemente del lugar (ya sea la pluviselva tropical, las llanuras del Serengeti, las tierras bajas calizas de Inglaterra o el Central Park neoyorquino), las hormigas que asisten a las orugas protegen también a otros insectos y plantas productores de secreciones. En un hábitat dado, orugas, insectos homópteros y plantas pueden establecer todos ellos simbiosis con hormigas; pero si lo hacen, compartirán las mismas hormigas simbiontes.

Las pautas observadas inducen a suponer que, a lo largo de la historia de la vida, sólo una pequeña fracción de la diversidad total de las hormigas se ha visto comprometida en la evolución de la simbiosis con las orugas. Las implicadas influyeron, a buen seguro, en la evolución de los insectos y de las plantas que tenían capacidad de emitir secreciones; y una vez estas emisiones adquirieron interés en la dieta de determinadas hormigas, cualquier otro insecto o planta secretores pudo haberse rodeado de una guardia pretoriana de hormigas, promoviendo así la evolución de una nueva simbiosis.

La dinámica de la simbiosis entre orugas de mariposas, otros insectos productores de secreciones, plantas y determinadas hormigas trae a la mente un ulterior concepto evolutivo. Puesto que ambos, insectos mirmecófilos herbívoros y plantas, utilizan las mismas hormigas como defensas móviles, podrían estar compitiendo por la atención de las hormigas. Así, cuando las orugas de *Thisbe* reclutan las hormigas para convertirlas en sus guardianes en las plantas de *Croton*, no sólo consiguen la protección buscada, sino que eluden, además, la defensa de la planta: las orugas de *Thisbe* pueden alimentarse de *Croton*, mientras que la mayoría de los demás insectos fitófagos no pueden. Las orugas se han invitado a la simbiosis hormiga-planta y la han socavado de manera sutil. Es posible que la evolución de la mirmecofilia haya permitido que los insectos herbívoros invadan y exploten las simbiosis entre plantas y hormigas.

El estudio de las especies que viven en interacción arroja nueva luz sobre el mundo natural y nos obliga a considerar las asociaciones simbióticas en un contexto mucho más dinámico. Mi trabajo, que comenzó en mera descripción de la interacción entre las orugas de *Thisbe* y las hormigas, me adentró en los órganos de hormigas especializados que median su simbiosis. Y según suele suceder en la investigación ecológica, se hizo imprescindible en seguida conocer la situación en otras especies de insectos y de plantas para recabar una aproximación, siquiera rudimentaria, al sistema *Thisbe*-hormiga. Las interacciones y los paralelismos entre las simbiosis condujeron a descubrimientos de interés para la comprensión de la dinámica insecto-planta, las interacciones depredador-presa, los sistemas de comunicación de los insectos y la evolución de las simbiosis en las que están implicados insectos, plantas y hormigas.

El estudio de las hormigas y de las especies mirmecófilas ha puesto ante mis ojos algunas de las interacciones que pueden ocurrir en la naturaleza, por no hablar del escondido placer del naturalista. Muchas veces, en el lindero de un bosque y contemplando un yermo paisaje de deforestación, he pensado en cuán pocas interacciones simbióticas son advertidas o comprendidas, y en las innumerables que habremos ya perdido para siempre.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EVOLUTION AND BIOGEOGRAPHY OF ASSOCIATIONS BETWEEN LYCAENID BUTTERFLIES AND ANTS. N. E. Pierce en *Oxford Surveys in Evolutionary Biology*, vol. 4. Oxford University Press. 1987.

THE LARVAL ANT-ORGANS OF *THISBE IRENEA* (LEPIDOPTERA: RIODINIDAE) AND THEIR EFFECTS UPON ATTENDING ANTS. P. J. DeVries en *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 94, n.º 4, págs. 379-393; diciembre de 1988.

BUTTERFLY EXPLOITATION OF AN ANT-PLANT MUTUALISM: ADDING INSULT TO HERBIVORY. P. J. DeVries e I. Baker en *Journal of the New York Entomological Society*, vol. 97, n.º 3, págs. 332-340; julio de 1989.

HOST SPECIFICITY AMONG *MACULINEA* BUTTERFLIES IN *MYRMICA* ANT NESTS. J. A. Thomas, G. W. Elmes, J. C. Wardlaw y M. Woyciechowski en *Oecologia*, vol. 79, n.º 4, págs. 452-457; junio de 1989.

ENHANCEMENT OF SYMBIOSES BETWEEN BUTTERFLY CATERPILLARS AND ANTS BY VIBRATIONAL COMMUNICATION. P. J. DeVries en *Science*, vol. 248, n.º 4959, págs. 1104-1106; 1 de junio de 1990.

THE MUTUALISM BETWEEN *THISBE IRENEA* BUTTERFLIES AND ANTS, AND THE ROLE OF ANT ECOLOGY IN THE EVOLUTION OF LARVAL-ANT ASSOCIATIONS. P. J. DeVries en *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 43, n.º 3, págs. 179-195; julio de 1991.

Semiconductores de película de diamante

Las finas láminas de diamante formadas a partir de un gas a baja presión y dopadas con impurezas podrían ser la base de una nueva generación de dispositivos electrónicos

Michael W. Geis y John C. Angus

El diamante es la sustancia conocida de mayor dureza y la menos compresible. A temperatura ambiente, es la que conduce mejor el calor, y en ausencia de defectos e impurezas es una de las más transparentes. Todas estas cualidades pueden atribuirse a la singular naturaleza de sus enlaces estructurales: los átomos de un cristal de diamante están empaquetados de un modo más compacto que cualquier otro material. Además, las fuerzas que ligan a los átomos entre sí son más intensas que las de la mayoría de los sólidos.

Dejando aparte su interés científico, estas propiedades extremas confieren al diamante una gran utilidad tecnológica. Puede emplearse como abrasivo industrial, instrumento incisivo en cirugía y sumidero de calor para refrigerar componentes electrónicos. Se ha demostrado también que los diamantes contaminados ("dopados") con diversas impurezas se comportan como semiconductores, si bien los cristales naturales son demasiado pequeños y caros para utilizarlos en la práctica.

Tal situación está en proceso de cambio. Durante los cinco últimos años, se han elaborado técnicas muy diversas para la deposición de películas de diamante de espesor cada vez menor, desde más de un milímetro hasta pocos centenares de átomos. Gracias a dichas técnicas —algunas de ellas permiten fabricar cristales planos y grandes— sería posible la obtención práctica de semiconductores de diamante. Los dispositivos resultantes trabajarían a velocidades mucho más altas que sus equivalentes de silicio, y a temperaturas de hasta 700 grados Celsius, que destruirían cualquier otro dispositivo electrónico.

Para convertir en realidad tales posibilidades, los autores de este artículo y otros muchos investigadores están poniendo a punto métodos de crecimiento que permiten obtener cristales de gran tamaño y alta calidad. Asimismo se estudia la forma de introducir en el diamante impurezas controladas con gran precisión que lo hagan conductor, y se idean procedimientos para grabar circuitos sobre este material.

Desde que, a finales del siglo XVIII, Antoine Laurent Lavoisier descubriera que el diamante es una forma cristalina del carbono, son muchos los investigadores que han intentado sintetizarlo. El primero en lograrlo fue William G. Eversole, de la empresa Union Carbide, quien en 1952 consiguió desarrollar semillas de cristales de diamante a partir de monóxido de carbono e hidrocarburos gaseosos a presión moderada. Sin embargo, la mayoría de los trabajos anteriores se habían orientado hacia procesos que pudieran convertir el grafito en diamante, a presiones elevadas.

El grafito es la forma más estable del carbono en condiciones normales. A presiones en torno a 60.000 atmósferas y por encima de los 1500 grados Celsius de temperatura, es el diamante, sin embargo, la fase termodinámicamente estable. Al parecer, los diamantes naturales han cristalizado bajo presiones similares a la citada. En los procesos de crecimiento a alta presión, el carbono se disuelve en un metal de transición fundido que sirve, a la vez, de disolvente y catalizador; al cabo del tiempo, se nuclean y crecen los cristales de diamante.

En 1953, un grupo de investigadores suecos de la Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) sintetizó diamantes a alta presión, pero, inexplicablemente, decidieron no dar cuenta de su descubrimiento. Fue la General Electric quien anunció haberlo logrado en 1955. Los procesos de crecimiento a presiones elevadas exigen la utilización de equipos muy costosos, y únicamente pueden acometerlos compañías poderosísimas. La producción total de diamante en el mundo asciende tan sólo a unas 100 toneladas al año.

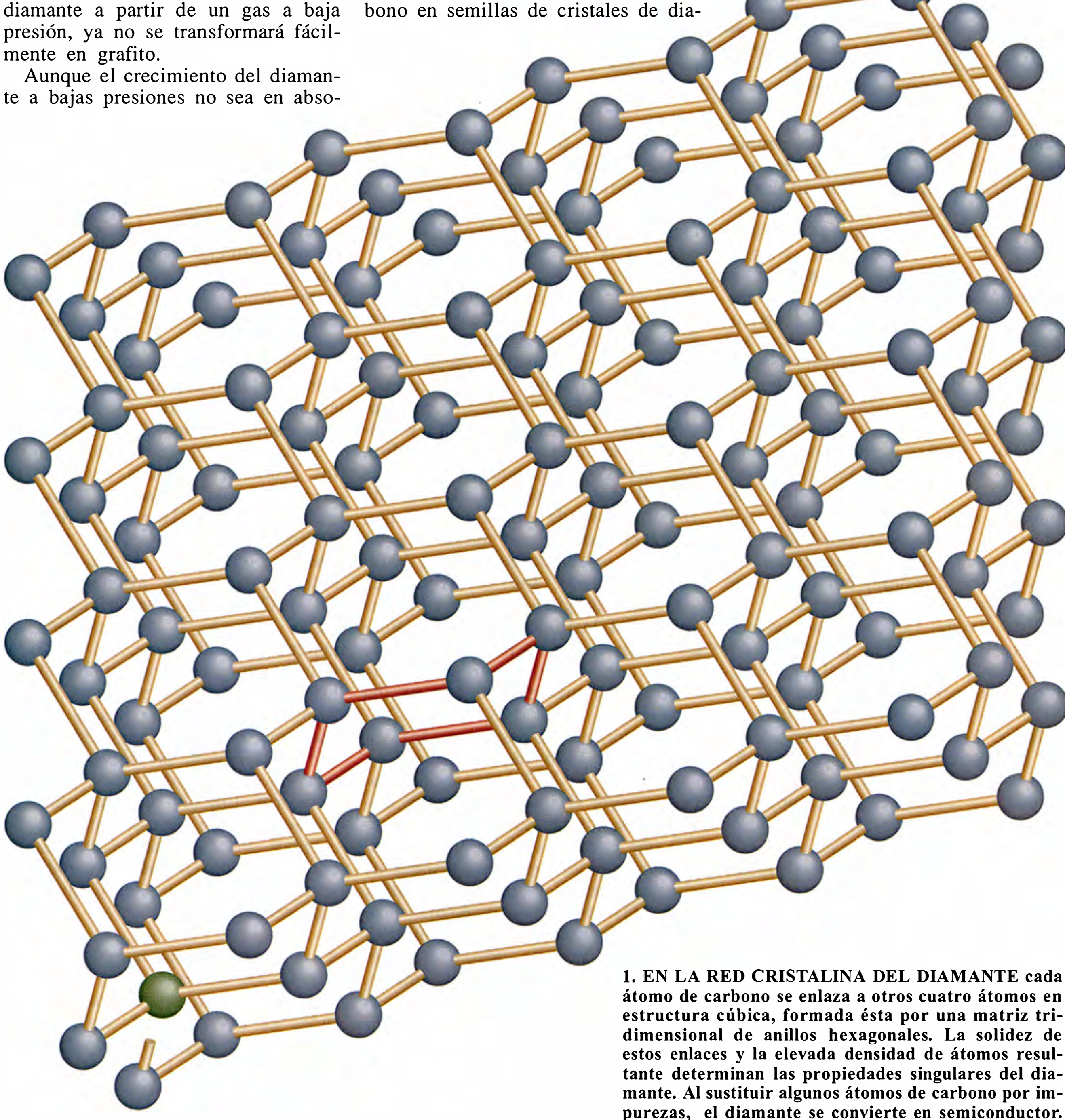
Mientras se estaban perfeccionando las técnicas de crecimiento de diamante a presiones elevadas, muchos expertos consideraban que la síntesis de diamante a baja presión sería algo así como la transmutación de plomo en oro: una violación de los principios fundamentales de la termodinámica. El razonamiento se basaba en que, a bajas presiones, el grafito es más estable que el diamante y, por tanto, no debería formarse éste, y en el caso de que lo hiciera, se convertiría inmediatamente en grafito. No obstante, la realidad es que la existencia de una forma más estable de carbono (el grafito) no excluye el crecimiento de otra forma metaestable (el diamante). En la propia naturaleza se forman muchos materiales metaestables. Por ejemplo, el carbono acumulado en el hollín de una vela es también metaestable y se da en un estado energético más alto que el del diamante.

MICHAEL W. GEIS y JOHN C. ANGUS han estudiado la deposición y las características de las películas de diamante. Geis trabaja en el laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde ha desarrollado transistores de diamante y técnicas de grabación de circuitos. En 1976 se doctoró en física por la Universidad de Rice. Angus, doctor en ingeniería química por la Universidad de Michigan en 1960, lleva más de 25 años trabajando en técnicas de crecimiento de diamantes. Su equipo de la Universidad Case Western Reserve sintetizó las primeras películas de diamante semiconductor en 1971.

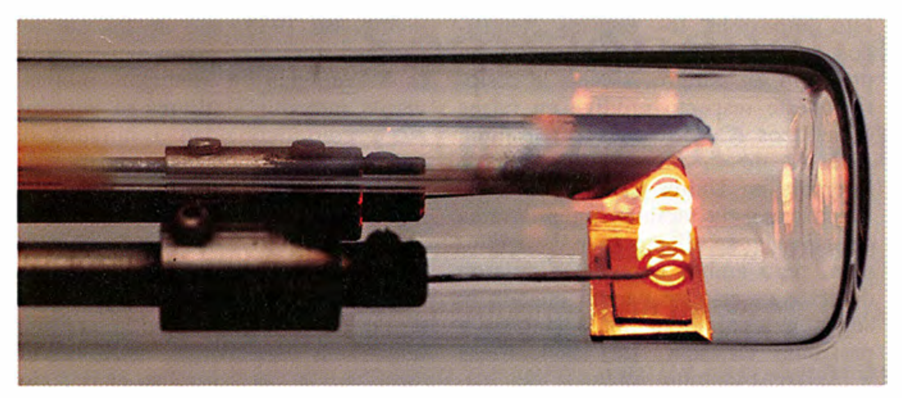
Los materiales pueden permanecer indefinidamente en un estado metaestable, siempre que las barreras energéticas a remontar para alcanzar un estado de energía más estable adquieran cierto grado. La diferencia entre las energías de los átomos de carbono en el diamante y en el grafito es tan sólo de unas 0,5 kilocalorías por mol, mucho menos que la energía necesaria para derretir la margarina. Sin embargo, para transformar el diamante en grafito hay que aportar suficiente energía para romper virtualmente todos sus enlaces, es decir, para que el diamante se convierta en vapor. Si alguna vez puede conseguirse la formación de diamante a partir de un gas a baja presión, ya no se transformará fácilmente en grafito.

Aunque el crecimiento del diamante a bajas presiones no sea en absoluto imposible, los escasos científicos que lo intentaron pusieron su prestigio en peligro, siendo la historia a este respecto pródiga en falsos comienzos y callejones sin salida. Además de la labor iniciadora de Eversole en Union Carbide, General Electric poseía también un programa de síntesis de diamante a baja presión, pero ambas compañías dejaron de trabajar en este campo cuando la segunda logró éxito en la síntesis a presiones elevadas. En 1956, Boris V. Spitsyn, alumno graduado del Instituto de Química Física de Moscú, propuso un método de crecimiento de diamante basado en la descomposición térmica del tetrayoduro de carbono en semillas de cristales de diamante. En 1959, uno de los autores (Angus), que a la sazón estudiaba en la Universidad de Michigan, propuso varios métodos similares al anterior. No se dio publicidad a ninguna de estas propuestas, y al parecer estos primeros investigadores desconocían los avances de sus colegas.

A mediados de los años sesenta los trabajos en este sentido habían llegado al agotamiento. Esencialmente, el único signo de vida era una larga lista de patentes cuyas reivindicaciones a veces rozaban el ridículo; quizá la más divertida era la afirmación de que podrían hacerse crecer



1. EN LA RED CRISTALINA DEL DIAMANTE cada átomo de carbono se enlaza a otros cuatro átomos en estructura cúbica, formada ésta por una matriz tridimensional de anillos hexagonales. La solidez de estos enlaces y la elevada densidad de átomos resultante determinan las propiedades singulares del diamante. Al sustituir algunos átomos de carbono por impurezas, el diamante se convierte en semiconductor.



2. CAMARA DE DEPOSICION, donde se hacen crecer láminas de diamante. Contiene un sustrato sobre el que se forman los cristales, un filamento de tungsteno y un tubo alimentador que suministra hidrógeno y un hidrocarburo simple como el metano. La cámara mantiene una presión aproximada de 0,1 atmósferas. El filamento calienta los gases y rompe sus enlaces moleculares, con lo que el hidrógeno atómico resultante elimina cualquier átomo de carbono que se haya depositado en forma de grafito y sólo permite el crecimiento de cristales de diamante. Se utilizan también descargas de microondas e incluso antorchas de oxiacetileno en vez de filamento de tungsteno. (Fotografía de Robert Clausing.)

diamantes haciendo girar un neumático de bicicleta con tal rapidez que la fuerza centrífuga convirtiera al carbono del caucho en diamante.

En 1965 Angus empezó a trabajar en la Universidad de Case Western Reserve. Se propuso recabar pruebas experimentales convincentes del crecimiento de diamante a bajas presiones. Al cabo de un año, él y sus colaboradores habían reproducido los resultados de Eversole. Para demostrar que estaban sintetizando diamante, añadieron a la fuente de gas metano pequeñas cantidades de diborano y obtuvieron un diamante semiconductor de color azul. (Otras formas de carbono no mostraban este efecto al ser dopadas con boro.) Sin embargo, la velocidad del proceso de crecimiento cristalino era demasiado baja para tener valor comercial.

Estos lentos ritmos de crecimiento tenían su origen en un problema aparentemente insoluble: cualquier cambio de temperatura o presión que favoreciera la deposición de diamante primaba todavía más la deposición de grafito. La clave del progreso ha consistido en descubrir el modo de impedir la formación de grafito, muy a menudo mediante el uso de hidrógeno atómico; éste reacciona con cualquiera de los precursores parecidos al grafito para formar estructuras moleculares extraordinariamente semejantes a la estructura del diamante. El hidrógeno atómico reacciona también con los enlaces oscilantes libres que existen en la superficie del diamante, produciendo una configuración de átomos de carbono que guarda un estrecho parecido con el interior de la red cristalina. En virtud de dicho proceso, es mucho más probable que los nuevos átomos de carbono depositados sobre tal superficie se dispongan en una estructura cristalina, en lugar de enlazarse de manera amorfa o en disposición parecida a la del grafito.

En un principio, Angus y sus colaboradores de Case Western Reserve utilizaron hidrógeno atómico de una manera cíclica: depositaban diamante y grafito, lavaban después con hidrógeno la superficie del material para eliminar el grafito, y volvían a depositar diamante y grafito. Este método, en el que las moléculas de hidrógeno se disociaban mediante un filamento de tungsteno caliente, fue expuesto por sus autores en un congreso celebrado en Kiev en 1971. Posteriormente, los investigadores soviéticos, dirigidos por Boris V. Deryagin, del Instituto de Química Física, desarrollaron un proceso continuo en el que el hidrógeno eliminaba el grafito a medida que éste se iba formando.

El informe publicado por los soviéticos en 1976 fue el primero en dar cuenta de la formación de diamante sobre sustratos de distinta materia, con un ritmo de crecimiento que por primera vez era lo suficientemente rápido como para resultar de interés práctico. Aunque los soviéticos describían los diamantes que habían obtenido, no daban ningún detalle del método utilizado, y en consecuencia, fuera de su ámbito, muy pocos tomaron sus pretensiones en serio. Por si fuera poco, unos cinco años antes de la fecha citada, ese mismo grupo había anunciado el descubrimiento de la llamada "poliagua" —forma ostensiblemente polimerizada del agua cuyo comportamiento era debido a la presencia de impurezas—, y después se había retractado. Este desafortunado episodio creó un gran escepticismo sobre la veracidad de sus reivindicaciones de crecimiento del diamante a bajas presiones a partir de cualquier fuente.

Sin embargo, entre 1981 y 1983, un grupo japonés del Instituto Nacional para Investigación de Materiales Inorgánicos en Tsukuba-shi reveló algunos métodos de crecimiento de películas de diamante a presiones inferiores a la atmosférica. Nobuo Setaka, Yoichiro Sato, Seiichiro Matsumoto, Mutsukazu Kamo y sus colaboradores utilizaron filamentos de tungsteno y descargas de microondas para generar el hidrógeno atómico requerido en el proceso de crecimiento.

Aunque estas técnicas sigan siendo las más difundidas, también se utilizan las descargas de corriente continua y las descargas de radiofrecuencia. En una innovación sumamente interesante, Yoichi Hirose, del Instituto de Tecnología Japonés, ha depositado diamante a partir de la llama de una antorcha de oxiacetileno ligeramente rica en combustible. Esta llama produce hidrógeno atómico e hidrocarburos de bajo peso molecular que se condensan en diamante.

Ante los progresos logrados en Japón, las instituciones americanas y europeas regresaron con rapidez a este campo. Benno Lux, de la Universidad Técnica de Viena, organizó los primeros esfuerzos europeos de crecimiento de diamante a bajas presiones. En 1984, Thomas R. Anthony y Robert C. DeVries, de General Electric, reactivaron el tratamiento a bajas presiones, y Michael Pinneo fundó Crystallume, la primera compañía dedicada a la fabricación de películas de diamante. En 1985, la Oficina de Investigación Naval de los Estados Unidos patrocinó el trabajo de investigación básica que se realizaba en la Universidad estatal de Pennsylvania, la Universidad estatal de Carolina del Norte y el Laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Se cuentan ahora por centenares los laboratorios que en todo el mundo investigan la síntesis del diamante a baja presión.

La facultad de hacer crecer películas de diamante abre la posibilidad de fabricar semiconductores basados en este material, aunque para ello todavía haya que superar muchos obstáculos. El primer paso a dar es la producción de películas adecuadas para la fabricación de dio-

dos y transistores, ya que las películas policristalinas obtenidas por la gran mayoría de las técnicas de crecimiento consisten en miriadas de granos minúsculos. El desorden atómico que existe en el contorno de los granos explica la inviabilidad de las láminas para la producción de semiconductores.

Una de las técnicas de obtención de películas grandes y de alta calidad utiliza, a modo de plantilla, un sustrato monocristal de un material cuya estructura cristalina y espaciado atómico se asemejan a los del diamante. Este sustrato promueve el desarrollo del diamante con una orientación cristalográfica determinada. Los cristales de níquel, cobre, carburo de silicio, óxido de berilio y nitruro de boro poseen espaciados reticulares adecuados y han servido como plantillas para el crecimiento de cristales de diamante, proceso que recibe el nombre de heteroepitaxia. Sin embargo, hasta ahora los cristales de diamante crecidos sobre sustratos de los primeros cuatro materiales citados son demasiado pequeños y presentan excesivos defectos para poder utilizarse en dispositivos electrónicos. Algunos diamantes heteroepitaxiales de la mejor calidad han crecido sobre nitruro de boro, pero es todavía más difícil hacer crecer sustratos monocristal de nitruro de boro que de diamante.

Los grupos del Laboratorio Lincoln, la Universidad estatal de Wayne, el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad estatal de Carolina del Norte y la Case Western Reserve han desarrollado una técnica alternativa a la anterior, basada en el uso de un conjunto de cristales germinales de pequeño tamaño, todos ellos con la misma orientación cristalográfica. El diamante depositado sobre esa semilla de cristal mantiene dicha orientación.

Los cristales germen se fabrican en unas pocas horas mediante un proceso normalizado de crecimiento a alta presión. Limpiados, los cristalitos se clasifican según su forma y tamaño, tras lo cual se hacen pasar por una serie de tamices para dejar sólo los que midan alrededor de una décima de milímetro. Este polvo de tamaño uniforme se vierte sobre una mesa vibrante inclinada: así, los cristalitos redondeados ruedan hacia abajo y se desechan, y en cambio los cristales facetados van hacia arriba por efecto de la vibración, cayendo en una ranura colectora situada en la parte superior de la mesa.

Al tiempo que se van preparando estos cristales, se procede, aplicando las técnicas habituales de grabación de circuitos integrados, a formar sobre la superficie de una oblea de silicio una matriz de pozos piramidales, del orden de una décima de milímetro de anchura. Dado que el silicio posee idéntica estructura cristalina que el diamante, la forma de los pozos se ajusta exactamente a los cristales octaédricos de diamante.

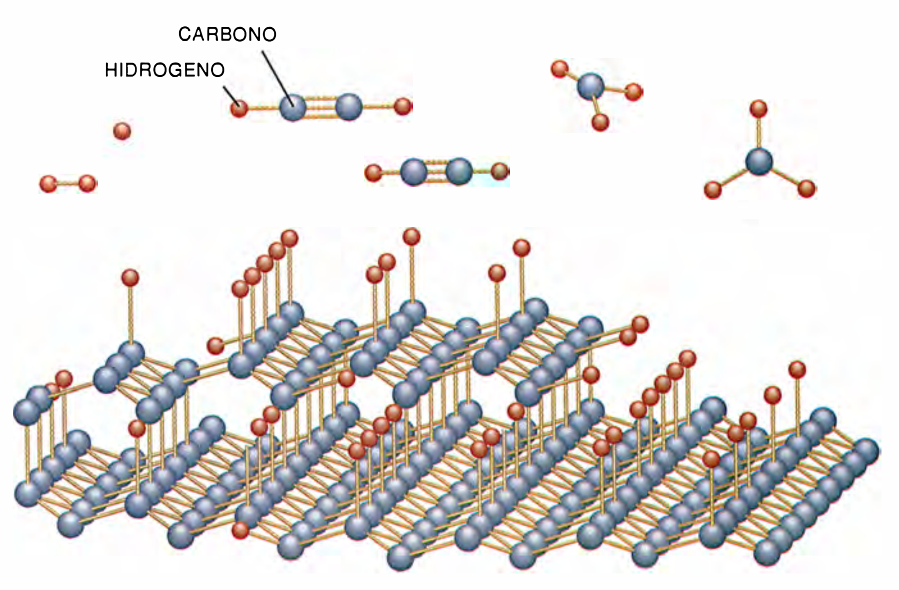
Los cristalitos antes seleccionados se agregan a un líquido en suspensión para formar una especie de pasta, donde se sumerge la oblea. Cuando los cristales se sedimentan, algunos de ellos se alojan en los pozos y los restantes se eliminan por lavado. Utilizando diamantes bien facetados y con un control cuidadoso de la limpieza de la pasta, se consigue que más del 95 % de los pozos contengan diamantes con orientaciones coincidentes dentro de un margen de algunas décimas de grado.

Sobre el conjunto así formado se procede a la deposición de una lámina de diamante de unos 250 micrometros de espesor; el resultado es una película gruesa de espesor uniforme que se autosustenta cuando se elimina el sustrato utilizado para mantener y orientar las semillas de diamante. Dicha película presenta rugosidades de grano suave debido a que la alineación de los cristales germen nunca es perfecta. Estas irregularidades, sin embargo, no parecen afectar negativamente a sus propiedades eléctricas, siendo estas películas equivalentes, para muchas aplicaciones prácticas, a los sustratos monocristalinos.

Los sustratos de diamante fabricados mediante esta técnica se cuentan entre los mayores de cuantos se han creado hasta la fecha, con diámetro incluso de dos centímetros y medio. Sin embargo, los equipos habituales de fabricación de semiconductores exigen sustratos circulares, con diámetros de cinco centímetros. Aunque la obtención de películas de ese tamaño no parezca presentar dificultades insalvables, lo cierto es que no se ha intentado todavía.

Una vez conseguidas películas de diamante del tamaño y la calidad que requieren los circuitos electrónicos, hay que convertirlas en conductoras. Recuérdese que, en un cristal de diamante perfecto, cada uno de los átomos de carbono está enlazado a otros cuatro átomos por los electrones de valencia de su capa más externa, y que liberar uno solo de estos electrones con el fin de que pueda conducir la electricidad necesita una energía de 5,5 electronvolts. Esta exigencia de energía es tan grande que, a la temperatura ambiente, quizá solamente existan uno o dos de estos electrones libres y móviles en un cristal de un gramo; para todos los efectos prácticos, el material se comporta como aislante.

Si se reemplaza uno de los átomos de carbono de la red cristalina por un átomo con cinco electrones de valencia, el electrón extra resultante no está fuertemente ligado; en consecuencia, puede moverse y convertir



3. SUPERFICIE DE UN CRISTAL DE DIAMANTE EN CRECIMIENTO, casi totalmente cubierta por átomos de hidrógeno (*rojo*). Los enlaces entre hidrógeno y carbono estabilizan las posiciones de los átomos superficiales y, por tanto, preservan la estructura reticular del diamante. Cuando los hidrocarburos simples (por encima de la superficie) se condensan sobre el diamante, los átomos de carbono forman un enlace químico y se incorporan al diamante.

en conductor el diamante. Pero si ese átomo de carbono se sustituye por un átomo con tres electrones de valencia, aparece un hueco, es decir, una partícula móvil con carga aparente positiva que proviene de la carencia de un electrón en la posición que le correspondería. La conductividad creada por la existencia de electrones suplementarios se denomina de tipo *n*, ya que los portadores de carga son negativos, mientras que se llama de tipo *p* (positiva) la conductividad resultante de los huecos.

Para la contaminación (dopado) de tipo *p* en el diamante conviene utilizar el boro, pues su átomo posee tres electrones en su capa más externa —uno menos de los requeridos para los enlaces de los átomos de carbono— y además ocupa un lugar inmediatamente adyacente al del carbono en el sistema periódico, por lo que su tamaño es suficientemente pequeño para poder ser incorporado en la compacta red cristalina del diamante.

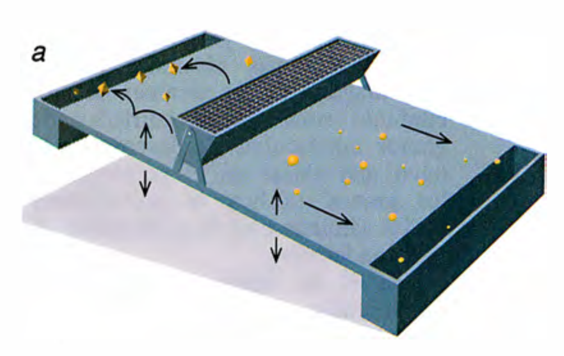
Sin embargo, el dopado del diamante con boro no es muy eficaz. Trasladar un hueco desde la vecindad del átomo de boro hasta la red del diamante, en la que podrá transportar corriente, requiere una energía de 0,36 electronvolts, diez veces la energía térmica que poseen los átomos en dicha red. De ahí que sea menor del 1% la proporción de átomos de boro en el diamante que aportan huecos al semiconductor. Si el diamante dopado con boro se calienta, y por tanto aumenta su energía térmica, escaparán más huecos de los átomos de boro y ello hará más conductor el material.

A diferencia de la mayoría de los semiconductores, el diamante puede trabajar mejor a temperaturas elevadas, entre 100 y 500 grados Celsius. Este comportamiento contrasta fuertemente con el del silicio, por ejemplo, en el que la contaminación con boro produce huecos ligados débilmente, en su mayor parte móviles a temperatura ambiente. Unicamente bajo el frío extremo del helio líquido aumentará la resistividad del silicio, a medida que los huecos se vayan uniendo a los átomos de boro incorporados en el material. (Por el contrario, a altas temperaturas, muchos de los electrones de valencia del silicio se hacen móviles, imposibilitando el control de la conductividad.)

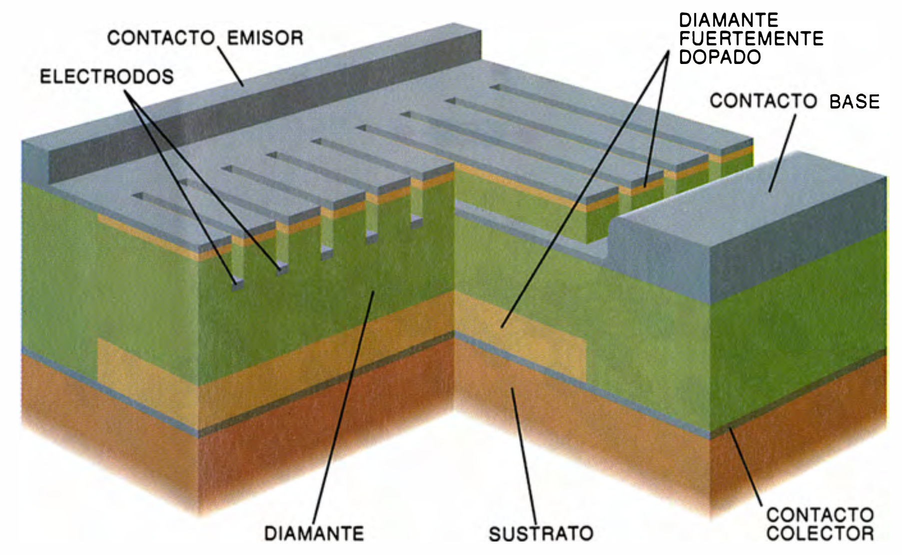
Si bien el diamante es mucho más resistivo que el silicio cuando está dopado con el mismo nivel de impurezas de boro, la estrecha semejanza de tamaño entre los átomos de boro y carbono permite añadir muchos más átomos de boro a la red de lo que sería posible en otros semiconductores. Este incremento en el nivel de dopado compensa en parte la mayor energía de enlace de los huecos individuales. De hecho, el diamante contaminado puede conducir la corriente eléctrica lo mismo casi que el silicio.

Mucho más difícil resulta la operación inversa, el dopado de tipo *n*. El nitrógeno podría ser la opción lógica, puesto que tiene cinco electrones en su capa más externa y es vecino del carbono en el sistema periódico. Por otra parte, el nitrógeno es un átomo pequeño y se disuelve fácilmente en el diamante. Sin embargo, cada uno de los electrones suplementarios está ligado a su átomo con una energía del orden de 1,7 electronvolts. Sin embargo, a temperatura ambiente, tan sólo una minúscula fracción de los electrones añadidos se mueve con entera libertad en el seno del cristal. El nitrógeno no es, por consiguiente, un eficaz agente de dopado tipo *n*.

El átomo de fósforo posee también cinco electrones externos y podría ofrecer la siguiente solución más ventajosa. De hecho, los limitados resultados experimentales actualmente disponibles indican que la adición de fósforo produce diamante semiconductor de tipo *n*. Sin embargo, dado que el átomo de fósforo es considerablemente mayor que el de carbono, resulta imposible disolver una cantidad apreciable de tales átomos en el diamante. En resumen, el dopado de tipo *n* del diamante hasta ahora no ha demostrado ser eficaz.



5. LA DEPOSICION de películas de diamante de gran tamaño, virtualmente sin defectos, se inicia con semillas de cristales de diamante, clasificados según tamaño y forma por medio de tamices y una



4. TRANSISTOR DE DIAMANTE formado por tres capas (*amarilla, verde* y *amarilla*), cada una con diferente nivel de dopado en boro. Las capas superior e inferior (emisor y colector) transportan las corrientes de entrada y de salida del transistor. La corriente que atraviesa la capa central (base) está controlada por una tensión aplicada a los electrodos (*azul*) embutidos en ella.

En virtud de lo que antecede, la mayoría de los dispositivos de semiconductores basados en diamante utilizan portadores de cargas positivas. Así, para fabricar un transistor se depositan sucesivamente una capa de muy alto nivel de dopado en boro (en la que quizás algunas unidades por ciento del total de átomos sean de boro), una capa con un escaso nivel de dopado, y de nuevo otra capa con alto nivel de dopado. Las capas constitutivas de la cara superior y la cara inferior transportan las corrientes de entrada y de salida del dispositivo, y generalmente están adheridas a conexiones metálicas. La corriente que circula por el dispositivo se controla haciendo variar la tensión en un electrodo de entrada embutido en la capa central de dopado ligero.

b GERMEN DE DIAMANTE

SILICIO

c

d EPITAXIA DE DIAMANTE

mesa vibrante inclinada (*a*). Mientras tanto, se graba una matriz de pozos de forma piramidal en una oblea de silicio (*b*). Al verter sobre el sustrato una suspensión que contiene los cristales germen, éstos se alojan en los pozos, con sus caras alineadas en un mismo sentido con error menor de un grado (*c*). La subsiguiente deposición del diamante forma una película que presenta suave granulación en la confluencia de las redes de diamante que brotan de cada germen, sin que ello afecte a las propiedades electrónicas de la película (*d*). Así se han producido películas de unos 25 mm de ancho.

El espesor y la concentración de boro en dicha capa central determinan el valor máximo de la tensión de funcionamiento y la capacidad de transportar corriente del dispositivo. A mayor espesor de la película y menor concentración de boro, mayor será la tensión de funcionamiento del dispositivo, pero menor su capacidad de transportar corriente. Como ejemplo, un dispositivo de 15 micrometros de espesor y un centímetro cuadrado de superficie, con una concentración de 10^{16} átomos de boro por centímetro cúbico —aproximadamente un átomo de boro por 20 millones de átomos de carbono—, puede soportar una tensión de 3000 volts. Su resistencia en el estado conductor es del orden de 0,1 ohms, y a la temperatura de 225 grados se reduce hasta 0,01 ohms. Este dispositivo transporta una corriente de 10.000 ampères a una tensión de 3000 volts.

Si bien es posible especificar con precisión el espesor de las películas de diamante y su nivel de boro, resulta mucho más difícil de controlar la concentración de otras impurezas, como el nitrógeno. Basta un átomo de nitrógeno por cada 10^9 átomos de carbono para deteriorar sustancialmente las propiedades eléctricas de una película. Es casi imposible detectar tales niveles de concentración con los métodos analíticos al uso; por ello es una preocupación fundamental para el futuro de los diamantes el desarrollo de técnicas que permitan garantizar la pureza, únicamente superada en importancia por la producción de cristales de gran tamaño.

No solamente es difícil controlar la presencia de impurezas en las películas de diamante; tampoco pueden ser grabadas mediante las técnicas normales de fabricación de semiconductores. Las distintas configuraciones de circuitos grabados en pastillas (chips) se obtienen generalmente por medio del ataque de un gas que reacciona con el sustrato formando un compuesto volátil. Por ejemplo, el oxígeno ataca los compuestos que contienen carbono, como el grafito o los plásticos, con los que forma monóxido de carbono o dióxido de carbono gaseoso. El oxígeno es adsorbido en la superficie del sustrato, tras lo cual un láser o un haz de átomos acelerados hasta altas velocidades proporciona la energía adicional necesaria para iniciar la reacción de grabado.

El ataque del oxígeno al diamante se verifica con velocidad inferior en varios órdenes de magnitud a las de otros compuestos que contienen carbono. La superficie del diamante resulta ser relativamente insensible a dicho ataque, tal vez porque muy pocos átomos de oxígeno son adsorbidos en la misma. Cuando incide sobre dicha superficie un haz de átomos rápidos, se encuentra con una escasa presencia de oxígeno capaz de participar en el proceso de grabación.

En lugar del oxígeno, los investigadores del proceso de grabación del diamante utilizan dióxido de nitrógeno, cuya adsorción por dicho material resulta más fácil. En este caso, el proceso avanza a una velocidad diez veces mayor que la que se obtiene con el oxígeno. Por otra parte, la capa de dióxido de nitrógeno absorbe la mayor parte de la energía del haz atómico incidente, con lo que el diamante no sufre el daño cristalino que suele derivarse del proceso de grabación cuando se utilizan haces atómicos.

Gracias a sus propiedades eléctricas, el diamante resulta idóneo para la fabricación de transistores de alta tensión. En efecto, la descarga disruptiva del diamante se produce con intensidades de campo eléctrico de 20 a 50 veces las que desencadenan una conducción incontrolada en el silicio o el arseniuro de galio. Estas tensiones de ruptura más elevadas implican que las tensiones de funcionamiento máximas de los transistores de diamante sean proporcionalmente mayores que los de los transistores similares fabricados con otros materiales. Por otra parte, el tamaño de un transistor de diamante de alta potencia y alta tensión será menor que el de sus equivalentes de silicio o arseniuro de galio de similares prestaciones. Las menores dimensiones del dispositivo de diamante significan que los portadores de carga tendrán que recorrer una distancia menor, al tiempo que están sometidos a un campo eléctrico más intenso. De todo ello resulta que estos dispositivos podrán trabajar de 40 a 100 veces más aprisa que los de silicio o arseniuro de galio.

El intervalo entre bandas de 5,5 volts del diamante (medida de la energía requerida para liberar uno de sus electrones de valencia) hace que este material sea ideal para los dispositivos que han de operar a temperaturas elevadas. Por ejemplo, los diodos de Schottky de diamante, formados por la unión entre metales y diamante, son aptos para trabajar por encima de los 700 grados Celsius, y por tanto podrían ser utilizados en controladores digitales de motores o en sistemas similares que tuvieran que funcionar a temperaturas elevadas. Los mismos dispositivos fabricados con silicio, cuyo intervalo de bandas es tan sólo de 1,1 electronvolts, no podrían operar con eficacia a temperaturas superiores a 150 grados.

También resulta ser el diamante un semiconductor bastante insólito en cuanto a su capacidad de formar interfases de alta calidad con el dióxido de silicio. En el caso del silicio, tales interfases son el componente esencial del transistor de semiconductor metal-óxido de efecto de campo (en inglés, "metal-oxide semi-

conductor field-effect transistor" o MOSFET), que es el tipo de transistor habitual en los ordenadores y otras aplicaciones digitales. Un MOSFET consiste en un semiconductor recubierto con una capa de dióxido de silicio, sobre cuya cara superior se apoya un electrodo metálico. A dicho electrodo se aplica una tensión que crea un campo eléctrico, el cual penetra en el dióxido de silicio aislante y controla la concentración de los portadores móviles subyacentes (ya sean éstos huecos o electrones). Puesto que la conductividad del semiconductor está directamente relacionada con la concentración de portadores, la intensidad de la corriente que circula a través del transistor vendrá controlada por la tensión aplicada al electrodo.

La interfase entre el dióxido de silicio y la mayoría de los semiconductores no es adecuada para los dispositivos MOSFET. Cuando se aplica una tensión a un electrodo unido al dióxido de silicio, las cargas fijas se acumulan muy rápidamente en la interfase y anulan en su mayor parte el campo eléctrico. Dicho campo no penetrará entonces en el semiconductor, y la tensión tendrá un efecto escaso o nulo sobre la concentración de los portadores de carga.

Varios equipos de investigadores han logrado fabricar MOSFET de diamante. Ciertamente el MOSFET es una de las estructuras más a menudo utilizadas en el diseño de circuitos integrados, pero lo más importante es que los MOSFET de diamante pueden trabajar con eficacia mucho mayor que otros tipos de transistores de esta sustancia. Cuando se aplica una tensión negativa al electrodo de entrada (base), aparecen huecos adicionales en la interfase situada entre el dióxido de silicio y el diamante. La capacidad de transportar corriente del dispositivo decuplica la que tendría un dispositivo dopado solamente con boro.

La capacidad del diamante para formar conexiones de alta calidad con otros materiales se hace extensiva también a los metales. Cuando en un principio el interés se centró en el desarrollo de transistores de diamante, los expertos temieron que éste, al igual que otros muchos semiconductores de gran intervalo de bandas, sólo permitiría proporcionar contactos de baja calidad y elevada resistencia, contactos que harían peligrar muchas de las potenciales ventajas de los transistores de diamante al limitar su capacidad de transportar corriente.

La resistencia de un contacto entre el diamante y un metal disminuye a medida que aumenta el nivel de impurezas (dopado) del diamante. Pueden obtenerse contactos de baja resistencia óhmica, que permitan un libre flujo de corriente tanto de entrada como de salida del diamante, sin más que elegir en el dopado los mayores niveles de impurezas que sean admisibles en la práctica. Equipos del Centro de Sistemas Oceánicos Navales y de la Universidad estatal de Carolina del Norte han demostrado que, utilizando concentraciones de boro de algunas unidades por ciento, es posible fabricar contactos de baja resistencia que sean comparables con los obtenidos con silicio.

Aunque claramente estén a nuestro alcance los circuitos de estado sólido construidos con diamante, el futuro definitivo de este material puede yacer en dispositivos que se asemejen mucho más a un tubo de vacío que a un transistor. Además de otras propiedades eléctricas útiles, el diamante tiene una afinidad electrónica negativa intrínseca y estable. Los electrones de conducción pueden escapar muy fácilmente desde la superficie del diamante al vacío, siempre que a medida que se escapen los vayan reemplazando electrones procedentes de otra fuente. Ello contrasta con la difícil expulsión de electrones desde la mayoría de los materiales, que requiere temperaturas entre 1000 y 3000 grados Celsius, o campos eléctricos superiores a 10 millones de volts por centímetro. Se puede conseguir que algunos semiconductores como el silicio o el arseniuro de galio adquieran una afinidad electrónica negativa recubriéndolos con una capa fina de cesio, pero bastan cantidades muy pequeñas de agua u oxígeno para reaccionar con este revestimiento y destruir su efecto.

Liberados ya de la superficie del diamante, los citados electrones pueden ser acelerados por un campo eléctrico, concentrados en un haz para bombardear un blanco —tal vez un luminóforo, que brillará proporcionalmente a la corriente que sobre él incida—, o modulados por la acción de una señal externa. Los llamados cátodos fríos de diamante podrían utilizarse en la fabricación de pequeñas lámparas de descarga gaseosa, pantallas planas de ordenadores y televisores, y quizás incluso triodos microscópicos que superarían en prestaciones a los semiconductores habituales.

Uno de los autores (Geis) ha fabricado recientemente cátodos del tipo señalado. Los prototipos obtenidos no resultan afectados negativamente por la exposición al agua, oxígeno o aire. Operan a una densidad de corriente que se estima en unos 10 ampères por centímetro cuadrado, en contraste con los 50 ampères por centímetro cuadrado de los cátodos calientes utilizados en dispositivos de vacío, como los tubos de rayos catódicos o los amplificadores de alta potencia de los transmisores de radio o televisión.

Dado que no es necesario aplicar calor ni una tensión excesiva para expulsar a los electrones de los cátodos de diamante, los tubos de vacío que los contengan no deberían estar sujetos a los factores que acortan la vida de los cátodos convencionales. De hecho, la capacidad de transportar corriente de un cátodo de diamante viene únicamente limitada en la práctica por la resistencia del sustrato conductor que le proporciona electrones. En teoría, estos dispositivos deberían funcionar de modo fiable para densidades de corriente superiores a los 1000 ampères por centímetro cuadrado.

A tales niveles de corriente, estos dispositivos podrían ser la base de tubos de vacío en miniatura que tuvieran mayores capacidades en cuanto a potencia y gama de frecuencias que los propios transistores de diamante. Paradójicamente, entonces, los productos refinados de la electrónica de estado sólido conducirían a un resurgimiento de los tubos de vacío que los transistores eclipsaron hace ya más de treinta años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIAMONDS. Eric Bruton. Radnor, Pa., Chilton Book Company, 1978.

LOW-PRESSURE, METASTABLE GROWTH OF DIAMOND AND "DIAMONDLIKE" PHASES. John C. Angus y Cliff C. Hayman en *Science*, vol. 241, n.º 4868, págs. 913-921, 19 de agosto de 1988.

APPLICATIONS OF DIAMOND FILMS AND RELATED MATERIALS. Dirigido por Y. Tzeng, M. Yoshikawa, M. Murakawa y A. Feldman. Elsevier, 1991.

DIAMOND CHEMICAL VAPOR DEPOSITION. F. G. Celii y J. E. Butler en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 42. Annual Reviews, Inc., 1991.

LARGE BANDGAP ELECTRONIC MATERIALS AND COMPONENTS. Número extraordinario de *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, n.º 5, 1991.

METASTABLE GROWTH OF DIAMOND AND DIAMOND-LIKE PHASES. J. C. Angus, Y. Wang y M. Sunkara en *Annual Review of Materials Science*, vol. 21. Annual Reviews, Inc.

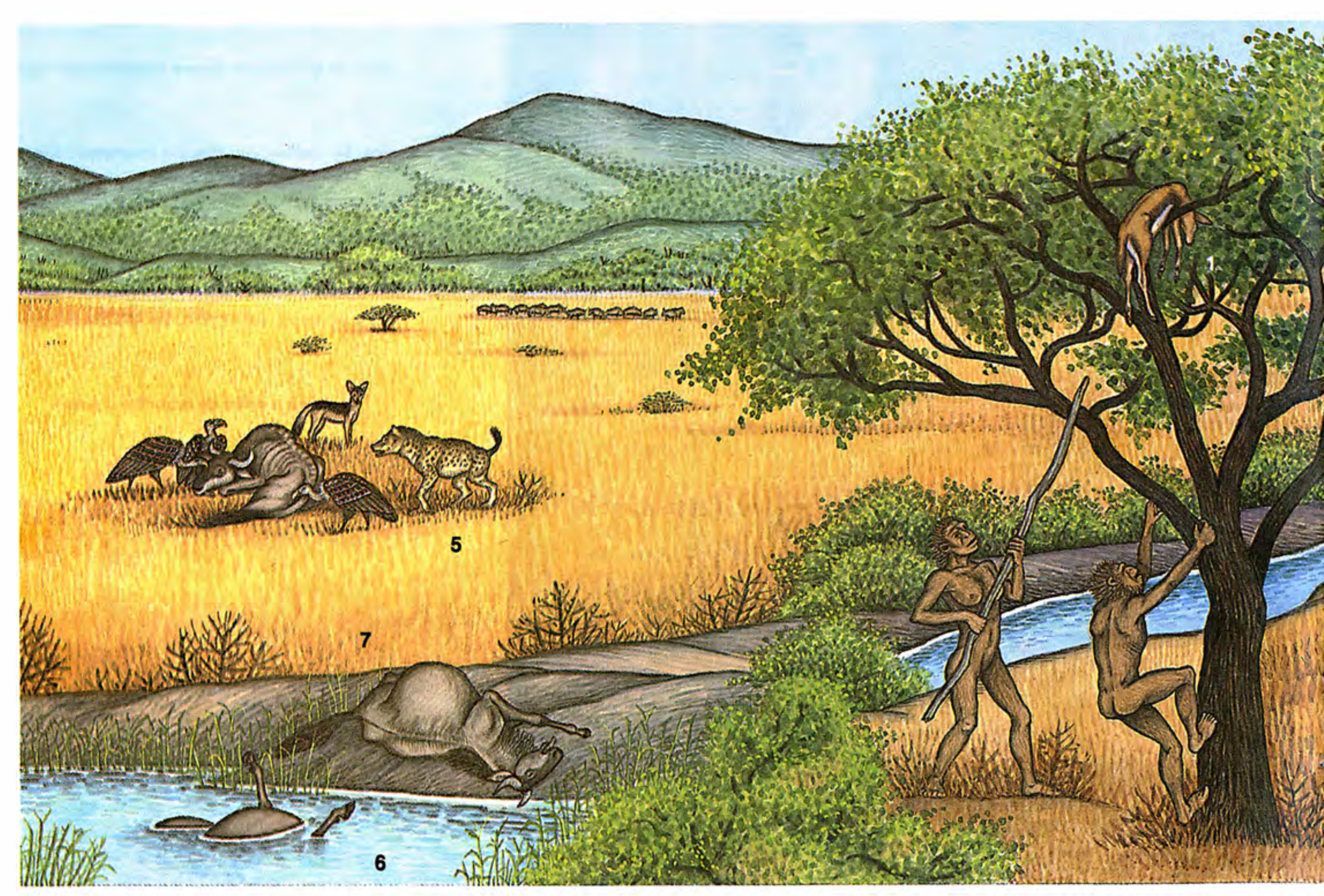
Carroñeo y evolución humana

El consumo de carne por los primeros homínidos contribuyó a conformar la evolución del cerebro, del comportamiento y de la capacidad creadora de útiles. Nuestros antepasados eran, sin embargo, mejores carroñeros que cazadores

Robert J. Blumenschine y John A. Cavallo

La expresión "hombre cazador" halaga nuestros oídos. ¿Quién no preferiría que se le comparase al león antes que al buitre? La caza tiene una imagen más noble que el carroñeo y, a primera vista, también es más provechosa. ¿Qué mejor modo de reafirmar nuestro éxito evolutivo que describir como poderosos cazadores a nuestros antepasados homínidos más primitivos? Muchos antropólogos coinciden en que el comer la carne de grandes animales contribuyó a formar el entorno físico y social donde se fueron seleccionando los rasgos que más diferencian a los humanos de los primates. Pero, ¿era, aquel alimento, adquirido mediante la caza o mediante el carroñeo? He aquí un tema que encierra, quizá, no menos interés que cualquier otro de los estudios de la evolución; tiene que ver, en efecto, con la definición de la naturaleza humana. Por desgracia, la respuesta dada por la hipótesis del "hombre cazador" se basa más en prejuicios de índole sexual o de otro género que en el estudio de restos fósiles y en la ecología del forrajeo (o búsqueda del sustento).

La escasa atención dedicada al carroñeo se debe, en nuestra opinión,



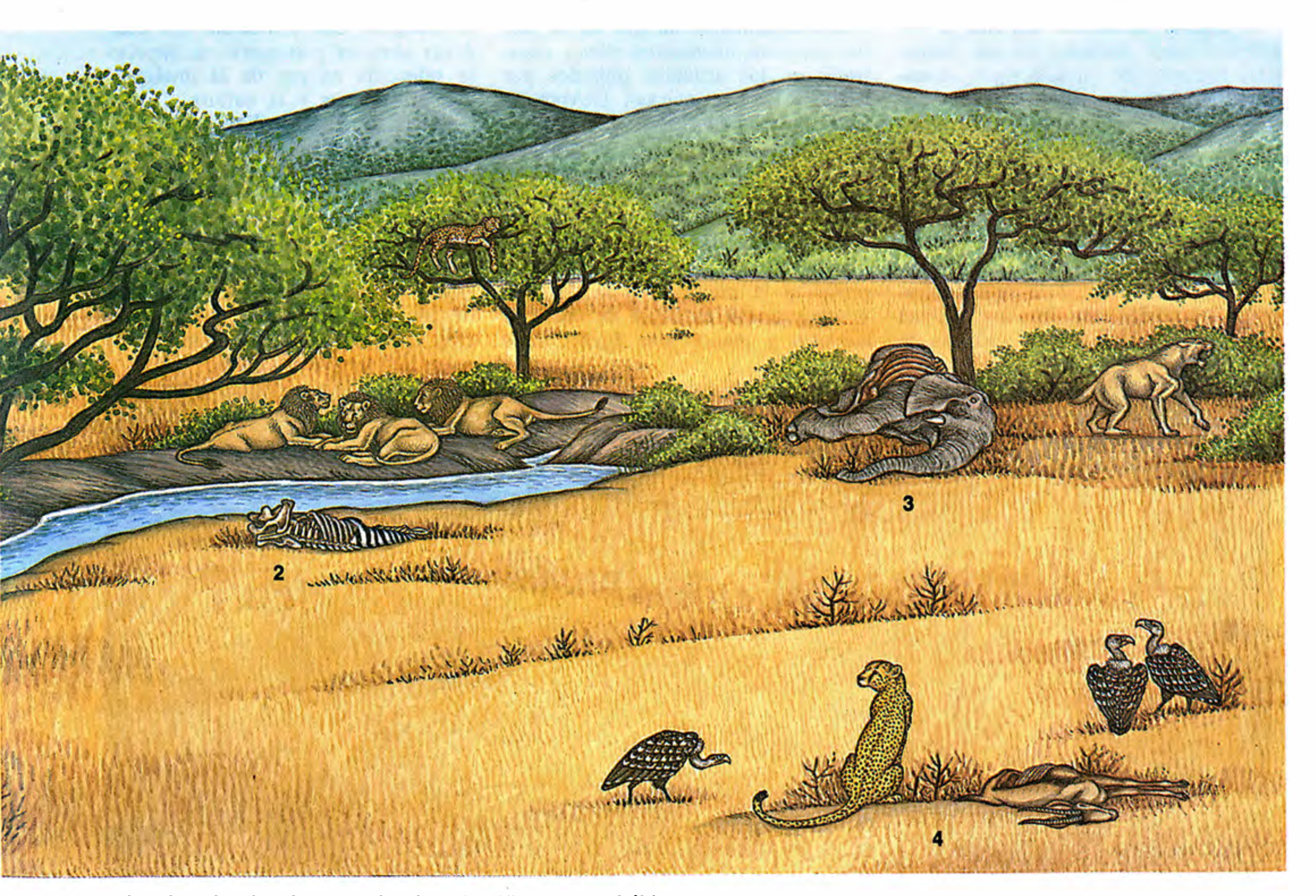
1. POSIBILIDADES DE CARROÑEO y sus oscilaciones según el tamaño del animal muerto, el terreno, la estación del año y las causas de la muerte. Los resultados serían, probablemente, mejores en los boscajes ribereños, pues los árboles darían refugio a los homínidos y ocultarían de los buitres las carroñas. Tal vez hubiera todo el año restos dejados en los árboles por leopardos (*1*); las sobras de los leones (*2*) abundarían durante la estación seca. Parece ser que los felinos de dientes

a que muchos antropólogos han tendido excesivamente a proyectar sobre el pasado los modos de vivir actuales. Suelen emplear términos como "cazadores-recolectores", "primates" o "carnívoros" para aludir a aspectos de la vida de los primeros homínidos que han quedado oscurecidos por el paso del tiempo, sin detenerse en las adaptaciones que les dieron carácter único. Los partidarios de la teoría del "hombre cazador" elevan también a los homínidos sobre los demás seres, como si nuestros antepasados fuesen inmunes a la mayoría de las tensiones que configuran las relaciones entre depredadores y presas. En toda esta temática dan por supuesto que los primeros homínidos encontraron la caza abundante, predecible y segura, mientras que el carroñeo era marginal, ocasional y peligroso.

ROBERT J. BLUMENSCHINE y JOHN A. CAVALLO estudian, en la Universidad de Rutgers, los hábitos alimentarios de los primeros homínidos. Blumenschine, profesor de antropología, es experto en dieta y forrajeo. Es codirector de los trabajos arqueológicos en la garganta de Olduvai de Tanzania. Cavallo, que está al frente del centro universitario de arqueología general, ha trabajado en la economía de la caza y la pesca en los nativos americanos prehistóricos.

Las conclusiones a que hemos llegado en nuestra investigación son muy diferentes: el carroñeo tal vez haya sido más común que la caza hace dos millones de años, en la transición del Plioceno al Pleistoceno. Los utensilios de piedra tallada, la práctica de descuartizar y trocear grandes animales y la evolución del *Homo* de mayor cerebro aparecen todos por primera vez en el registro físico de ese período. Puesto que muchos de los testimonios que lo demuestran se encuentran en yacimientos del Africa oriental, como el de la garganta de Olduvai, en Tanzania, nos propusimos descifrar los residuos de antiguos tipos de subsistencia en las vecinas reservas de caza: el Parque Nacional Serengeti y el Area de Conservación Ngorongoro de Tanzania. Y procuramos también examinar con objetividad la predominante opinión de que el carroñeo habría sido inferior a la caza.

En trabajos independientes emprendidos a lo largo de 20 meses, fuimos anotando cómo obtuvieron su comida predadores y carroñeros y qué trato dieron a los huesos que iban dejando atrás. Nuestro campo de trabajo unía, pues, la etología con la tafonomía, el estudio de cómo los eventos *post mortem* alteran las carcasas del registro fósil. Completábamos luego estos resultados con las pruebas paleontológicas y arqueológicas relativas al comportamiento de los protohomínidos. Este enfoque permite leer en el pasado tan sólo aquellos aspectos de la conducta y la ecología que dejan residuos conservables; y se evita la imposición indiscriminada del género de vida de una especie moderna que casualmente se acomode a nuestros ideales.



de sable abandonaban grandes despojos (*3*) por estos hábitats en cualquier época. Los restos dejados en campo abierto por leones, guepardos (*4*) y hienas (*5*) tenían menos interés para los homínidos, que llegaban a ellos más tarde que buitres y hienas y, además, no tenían dónde refugiarse de carnívoros más poderosos. Los ahogamientos (*6*) y las muertes por inanición (*7*) ofrecían oportunidades imprevistas, no todas exentas de riesgo para la vida del homínido.

La inexistencia en antropología de nada que reemplace a estos estudios de verificación realista puede demostrarse por las enseñanzas de los zoólogos acerca del comportamiento de la hiena, el carroñero por antonomasia entre el vulgo, y del león, predador prototípico. Hasta hace treinta años, nadie concebía que todo carnívoro caza y carroñea. Si los prejuicios pueden ocultar de tal modo la verdad respecto a los carnívoros actuales, ¿cuánto más cautos no deberán ser los científicos al reconstruir las formas de subsistencia de los extintos homínidos?

La teoría del "hombre cazador" nunca ha sido corroborada por el registro fósil. Fue Charles Darwin quien primero presentó la caza como el catalizador etológico que encauzó la selección hacia el agrandamiento del cerebro, el empleo de utensilios, la reducción de los caninos y el bipedismo separando así los linajes de los humanos de los antropoides. Expuso su hipótesis en *The Descent of Man* (1871), antes de ser hallado fósil alguno de época anterior a los neandertales. Cuando, en los primeros decenios de nuestro siglo, se encontraron especímenes de mayor antigüedad, sus descubridores los encajaron directamente en el esquema de Darwin. Raymond A. Dart, descubridor del género *Australopithecus*, se pasó unos treinta años tratando de demostrar que su homínido pudo haber cazado los animales cuyos huesos con tanta frecuencia se encontraban mezclados con los suyos. Para obviar el problema de la ausencia de utensilios de piedra en estos yacimientos, Dart postulaba un juego "osteodontoquerático" de útiles y armas fabricados con huesos, dientes y cuernos de diversos animales.

Esta interpretación se ganó el apoyo popular en las numerosas versiones que se dieron del "primate cazador" como antepasado de la estirpe humana; pero cayó en descrédito ante las comprobaciones decisivas del precursor de la tafonomía C. K. Brain, del museo Transvaal de Sudáfrica, quien demostró que los australopitécidos no habían en absoluto participado en recoger las osamentas de animales halladas junto a sus propios esqueletos. Antes bien, de sus escritos se infería que los leopardos cazaban tanto homínidos como ungulados y los devoraban en ciertos árboles preferidos, a cuyo pie dejaban caer amontonados los restos de ambos. Sin embargo, la hipótesis de la caza permanecía inamovible, por más que ahora hubiese que aplicarla a un estadio posterior de la historia de la evolución, iniciado al aparecer el ya más cerebrado *Homo habilis*.

Los argumentos en pro de la teoría expuesta alcanzaron pleno desarrollo en los artículos reunidos por Richard B. Lee e Irven DeVore en *Man the Hunter* (1968). En aquellos trabajos se bosquejaba un proceso evolutivo, iniciado con el asentamiento de los protohomínidos en la sabana, que exigía complementar su acostumbrada dieta vegetariana con cantidades crecientes de carne. La caza premiaba la previsión y la destreza y seleccionaba en favor de cerebros mayores y manos más ágiles; tales rasgos reforzaban, a su vez, la capacidad técnica, elevando el rendimiento de la inteligencia y aumentando la presión selectiva originaria. La actividad venatoria se convertía así en motor de un circuito automantenido de evolución social e intelectual.

Esta teoría prevaleció hasta finales de los años setenta, cuando un influyente artículo de Glynn Isaac desplazó el foco de interés de la obtención de carne al reparto de la misma (véase "Cómo compartían su alimento los homínidos protohumanos" , por Glynn Isaac; INVESTIGACION Y CIENCIA, junio de 1978). Isaac, arqueólogo de la Universidad de California en Berkeley, demostró que los primeros homínidos se asentaban en hogares —comportamiento nuevo—, lo cual en su opinión implicaba una división del trabajo en razón del sexo, otra innovación más. Para reforzar la estrategia omnívora, los machos recorrían mayores distancias en busca de carroñas comestibles o de presas no enteramente devoradas, las hembras cogían frutas y tubérculos cerca del hogar, y las familias compartían todo lo recogido. Con el tiempo, esta conducta altruista y cooperativa impulsó la selección en pro de la inteligencia, el lenguaje y la cultura.

Lewis R. Binford, hoy en la Universidad Metodista del Sur, fue aún más allá en 1981, cuando, al someter a un nuevo análisis tafonómico los datos obtenidos por Mary Leakey de los osarios más antiguos de Olduvai, sostuvo que en los tiempos del *Homo habilis* la evolución no había llegado a la caza ni a la compartición de comida. Los homínidos se



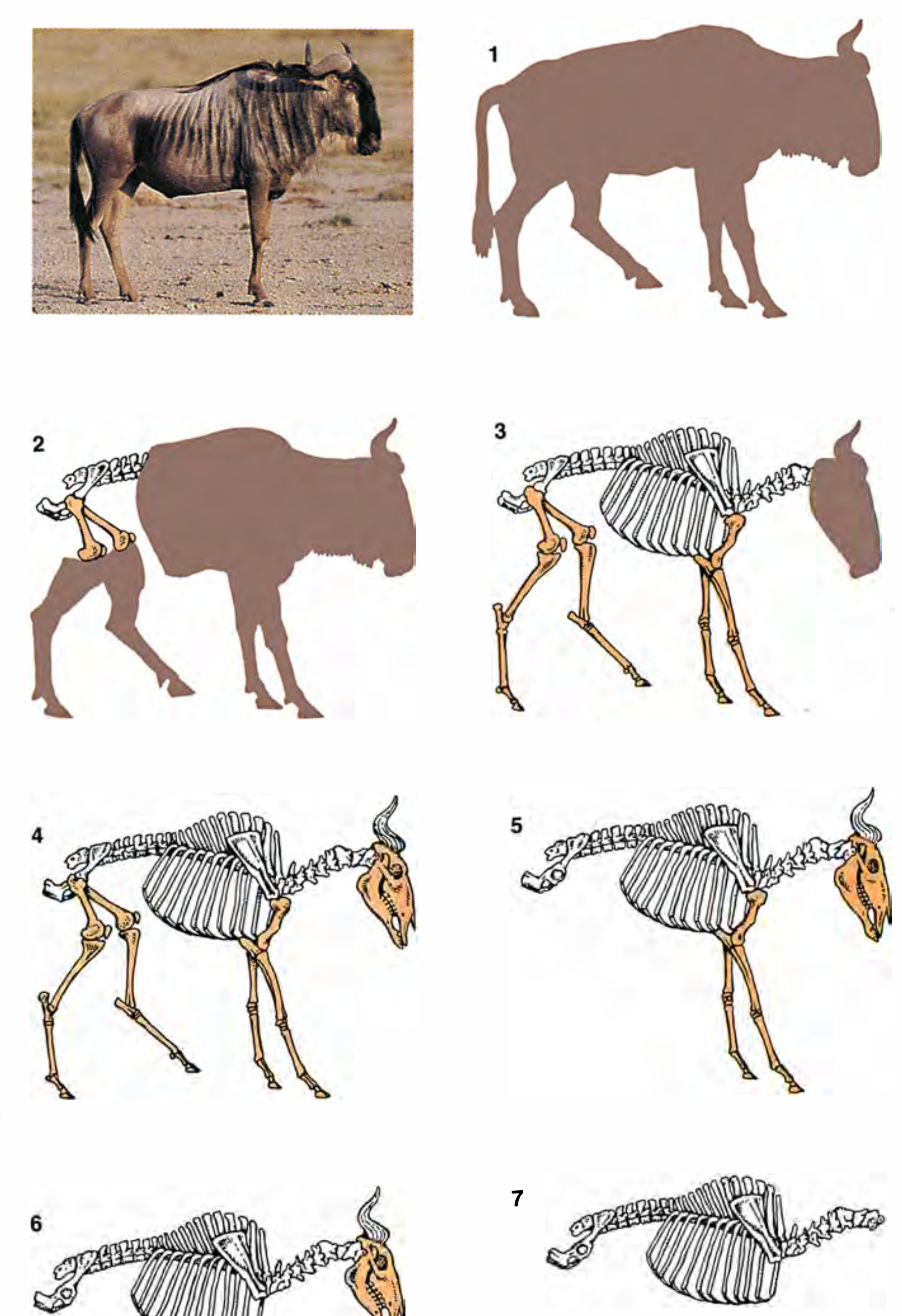
2. EL CARROÑEO EN LLANURA ABIERTA requiere velocidad y fuerzas mayores que las de los primeros homínidos. A este despojo de una presa del león llegaron antes que los buitres las hienas moteadas.

habían limitado a aprovechar los escasos restos abandonados por carnívoros más capaces, para lo cual quebrantaban las osamentas y extraían el tuétano. El carroñeo no podría, según Binford, haber proporcionado los excedentes de carne requeridos para compartir de un modo continuo la comida. Antes bien, las comidas de los protohomínidos se asemejarían, en su sentido social y nutritivo, a las dietas, esencialmente vegetarianas, de los primates modernos.

Binford sostuvo después, con similares fundamentos, que, incluso el primer *Homo sapiens* moderno de Africa meridional y sus neandertales europeos contemporáneos dependían del carroñeo para alimentarse de animales grandes y cazaban sólo los de menor tamaño. Mantenía, pues, la hipótesis de la caza, pero la acercaba más al presente, encajándola en los últimos 100.000 años. Su reconstrucción acepta que el carroñeo era una empresa penosa, y que la caza y la aneja compartición de comida fue una fuerza motriz de nuestra evolución, por más que sólo muy tarde tuviera efecto en ella.

Nuestra crítica de todo este planteamiento partió de evaluar la proeza que, para los primeros homínidos, supondría la práctica de la caza. El físico del *Australopithecus* y el del primer *Homo* no serían imponentes: la estatura de las hembras rondaría los 120 centímetros, con un peso aproximado en torno a los 30 kilogramos, mientras que los machos alcanzarían apenas 150 centímetros y pesarían unos 45 kilogramos; la longitud de sus brazos indica que seguían refugiándose en los árboles, y sin duda tendrían que hacerlo con frecuencia, enfrentados como estaban a predadores tan eficaces como los leones, los felinos de colmillos curvos y las hienas. En cuanto a sus utensilios, incluso el *Homo* manejaba un tipo muy primitivo de raspadores de piedra toscamente desbastada y, como martillos, pedruscos y cantos rodados. No aparecen armas propiamente dichas.

Sin embargo, los datos arqueológicos evidencian que aquellos débiles primates invadieron el nicho ecológico de los grandes carnívoros. En Olduvai y en otros lugares se han encontrado artefactos de piedra elementales, junto a fragmentos de huesos fósiles pertenecientes a una amplia gama de animales, de la gacela al elefante. Algunos de estos huesos muestran en su superficie las marcas de los dientes de los carnívoros, y en varios de ellos se advierten también incisiones producidas al descarnar y desarticular las osamentas con las toscas herramientas que los acompañan. Muchos huesos están fracturados y presentan indicios de machacamiento con piedras para extraer el tuétano. ¿Cómo podrían los protohumanos haber dado muerte a animales tan veloces o tan poderosos? Ello nos indujo a pensar que el carroñeo merecía un examen más detenido.

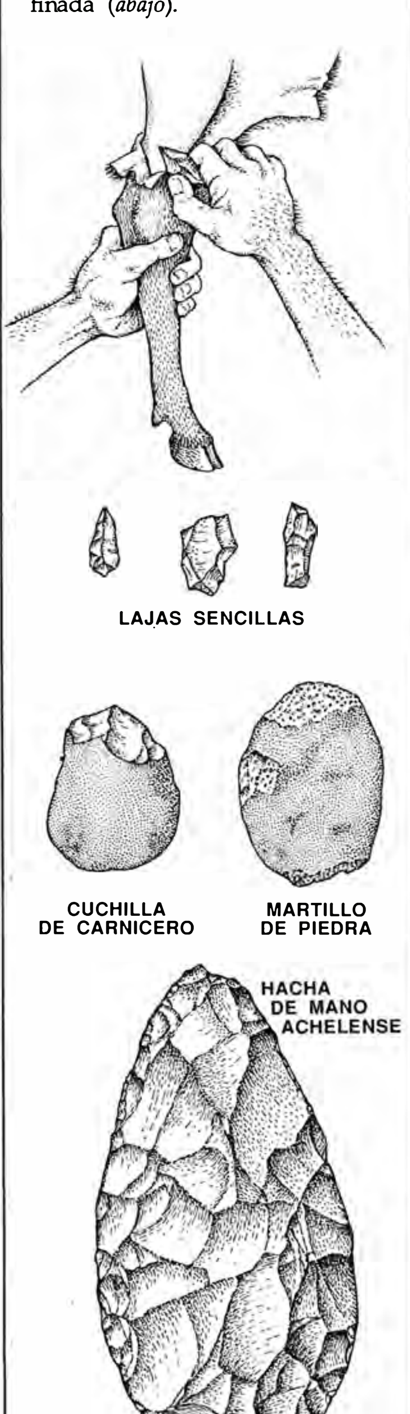


3. PROCESO DE DESPOJO DE UN ÑU, con las siete fases del carroñeo. Sólo las hienas y los homínidos provistos de utensilios podrán aprovechar los restos de animales de este porte más allá de la fase cuarta, rompiendo los huesos de las extremidades para extraer la médula y abriendo los cráneos para sacarles los sesos. En su estudio del *FLK Zinjanthropus*, yacimiento del Africa oriental de unos dos millones de años de antigüedad, Henry T. Bunn halló que preponderaban los fragmentos óseos de cráneos y de extremidades, lo cual encaja con la fase cuarta e indica que los homínidos aprovechaban esqueletos ya descarnados.

Quienes defienden la tesis de la caza arguyen que al homínido diurno le habría sido difícil localizar los restos de animales muertos dejados por los grandes predadores y que, si casualmente hallaba algunos, los habrían devorado ya del todo las hienas, las únicas capaces de triturar

Cubertería arcaica

Entre los utensilios de carnicería necesarios figuraban menudas lajas para arrancar los tejidos (*arriba*) y martillos de piedra para partir los huesos. Estos útiles se denominan de Oldowan por haber aparecido en los niveles más antiguos de la garganta de Olduvai. Se impuso luego la técnica achelense, cuyo ejemplo es una hacha de mano muy refinada (*abajo*).



huesos con los dientes para succionar el tuétano. Pero ese razonamiento deja de lado dos oportunidades de carroñeo que hemos descubierto en Tanzania: las piezas abandonadas a medio consumir por los grandes felinos entre el boscaje ribereño y los restos de animales enormes que sucumben por enfermedad o ahogados. Los homínidos en procura de sustento dentro de ese hábitat tal vez se compusieran un nicho que ningún otro carroñero hubiese explotado con tanto provecho.

Los bosques y malezas de las riberas fluviales habrían sido atractivos para unos bípedos parcialmente arbóreos, ofreciéndoles refugio y escondrijos donde ocultar restos a las miradas de los buitres, verdaderos vigías de la tribu carroñera. Por tales parajes se encuentran despojos de grandes ungulados, sobre todo durante la estación seca, cuando los leones abandonan los restos de las piezas mayores, del tamaño de cebras, una vez devoradas sus carnes. Los leopardos, por otra parte, dejan restos de ungulados más pequeños; estos despojos aparecen en cualquier estación y están resguardados al máximo dentro de las copas de los árboles. Hace dos millones de años, tal vez los felinos de dientes de sable proporcionaran una tercera oportunidad a los homínidos, también en bosques ribereños: las presas de estos extintos carniceros habrían ofrecido, una vez devoradas, grandes masas de carroña con muchos restos aún comestibles.

Nos parece verosímil, y así lo postulamos, que el carroñeo revistiera máxima importancia durante la estación seca, cuando más escasean los alimentos vegetales y se brindan diversas posibilidades de rebusca en los despojos. Aparte de los restos dejados por los leopardos, durante la estación lluviosa la caza no se concentra en focos ribereños como podría esperarse, sino que se dispersa por parajes dilatados y abiertos (estas carroñas al descubierto son muy pronto localizadas y consumidas por las hienas). Dado que el carroñeo pudiera haber hecho complementarse los hábitos carnívoros y herbívoros de procura de alimentos según las estaciones del año, nosotros no suponemos —a diferencia de los defensores del "hombre cazador"— que la consecución de carnes para comer fuese lo esencial de la adaptación homínida. Según prueba el registro dentario, los homínidos fueron siempre omnívoros, y el haber encontrado útiles de piedra junto a huesos de animales no demuestra que el consumo de carne haya sido predominante.

Con todo, el hábito carroñero puede haber convertido la estación seca en tiempo de abundancia. Es entonces cuando el hambre y la caza producen gran mortandad de animales, y hasta el más marginal de los despojos que los leones abandonan, con tal de que conservase tuétano y masa encefálica, podría suministrar bastantes más calorías de las que necesita diariamente un adulto, a costa de media hora de machacar los huesos con una piedra. Se consigue así alimento con más rapidez que recolectando plantas, y, si se hubiesen guiado por el criterio de productividad, los homínidos habrían preferido siempre el carroñeo a la recolección en todas las ocasiones en que aquél hubiese sido posible.

Esta preferencia habría sido marcadísima durante los rigores de la estación seca, cuando la productividad vegetal desciende al mínimo y son de esperar los abandonos de despojos cárnicos por los grandes felinos, lo que abrevia la búsqueda de tales recursos. Es similar la economía obtenida frente a la caza: se gasta menos energía en aprovechar el sustento de lo alto de un árbol o del suelo sin haber tenido que cazarlo antes.

Añádanse los menores riesgos que comporta el carroñeo. Si bien es cierto que toda carne que atraiga a los homínidos puede atraer también a los leones, y que éstos, al llegar, tal vez no hagan caso del muerto y persigan a los vivos, en nuestra exploración descubrimos que los grandes carnívoros suelen dejar desatendidos por largos períodos ciertas clases de restos. En ese intervalo temporal, tales sitios habrían sido seguros.

Y lo son en particular los despojos que los leones dejan descarnados entre las malezas ribereñas. Pudimos comprobar que las hienas quebrantahuesos no suelen descubrir esos restos hasta un día después de haberlos abandonado los leones, lo cual da un buen margen de oportunidad para un homínido capaz de martillear con una piedra. Los despojos dejados en los árboles por los leopardos proporcionan más comida (carne además de tuétano) con menos riesgo, sobre todo cuando el escondrijo contiene restos de varias presas. Los leopardos tienden a ir en solitario, y hasta un babuino o un chimpancé puede en ocasiones ahuyentarlos; y no es raro, además, que abandonen espontáneamente sus presas, algunas de ellas todavía enteras, durante de ocho a doce horas a lo largo del día.

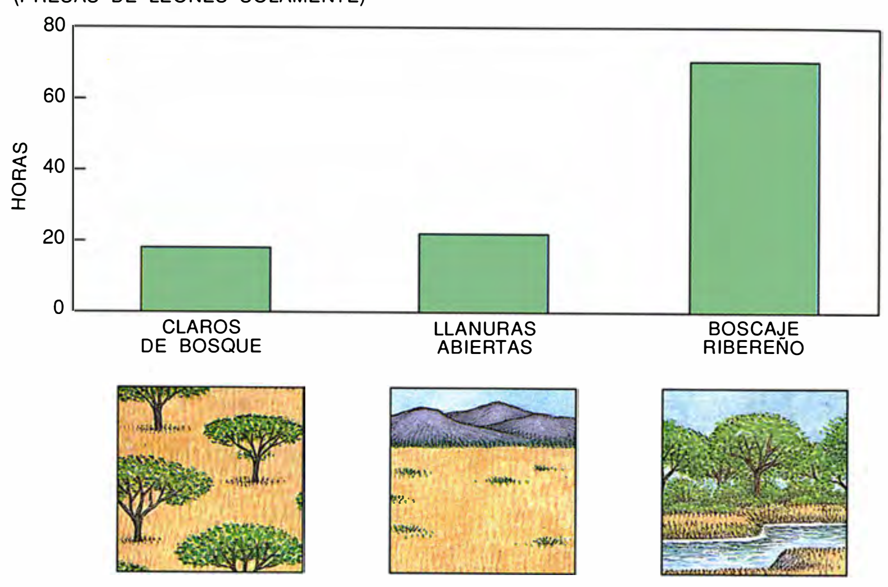
En estos bosques no correrían los homínidos mayores peligros dedicándose a carroñear que buscando alimentos vegetales.

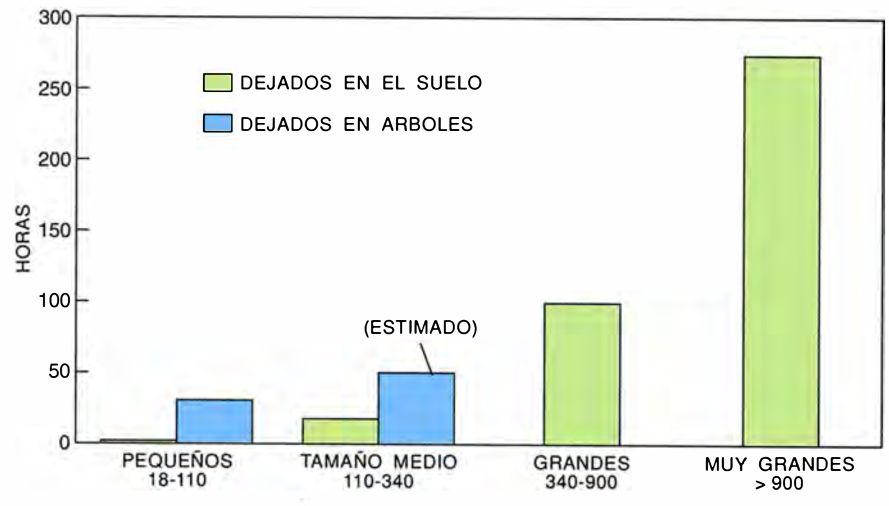
Donde sí puede que pesaran más los riesgos que los beneficios es en las llanuras abiertas, aun contando con las numerosas oportunidades que habría para apartar de sus abatidas presas al guepardo y al chacal, explotar los restos abandonados por el león en la estación húmeda y aprovecharse de las muertes naturales durante la sequía. Tal opinión se apoya en que la escasez de árboles privaría de refugio a los homínidos adaptados a la vida arborícola. Sin embargo, este inconveniente es aplicable, al menos con igual fuerza, a la caza: los grandes herbívoros saben defenderse, y aunque se lograra matar alguno el hecho resultaría tan llamativo que en seguida atraería a los carroñeros, competidores ventajosos en la mayoría de los casos para unos bípedos armados solamente con piedras.

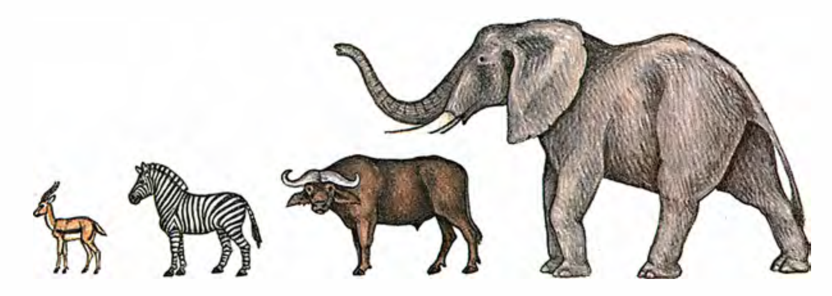
Los partidarios de la hipótesis del "hombre cazador" acaso repliquen que la caza es más sana que la carroña. No obstante, como pudimos comprobar en el Serengeti, pocos de los restos dejados en el suelo conservan algo comestible al cumplirse las 48 horas, tiempo que tarda en iniciarse la putrefacción, y aun entonces quedan encerrados bajo la piel o en el hueso tejidos perfectamente comestibles por estar al abrigo de insectos y de otros transmisores de enfermedades *post mortem*. Ni siquiera los restos procedentes de muerte "natural" suelen contener parásitos peligrosos, pues la mayoría de tales muertes se producen por desnutrición, no por enfermedad.

También se ha tachado de insano el carroñeo desde el punto de vista de la nutrición. John D. Speth, de la Universidad de Michigan, ha sugerido que los animales que perecían de hambre proporcionaban proteínas sin grasa suficiente para el equilibrio de la dieta, que podría así conducir a una forma de inanición. (Los nómadas de las sabanas la llamaron "fiebre del conejo" porque provenía de alimentarse exclusivamente de conejo y otras carnes magras.) Pero lo cierto es que los homínidos siempre han obtenido la mayor parte de sus calorías de los hidratos de carbono y los aceites vegetales, y que las posibilidades más regulares de carroñeo en la estación seca las brindan los restos de animales muertos por los depredadores, restos con grasa en los tuétanos.

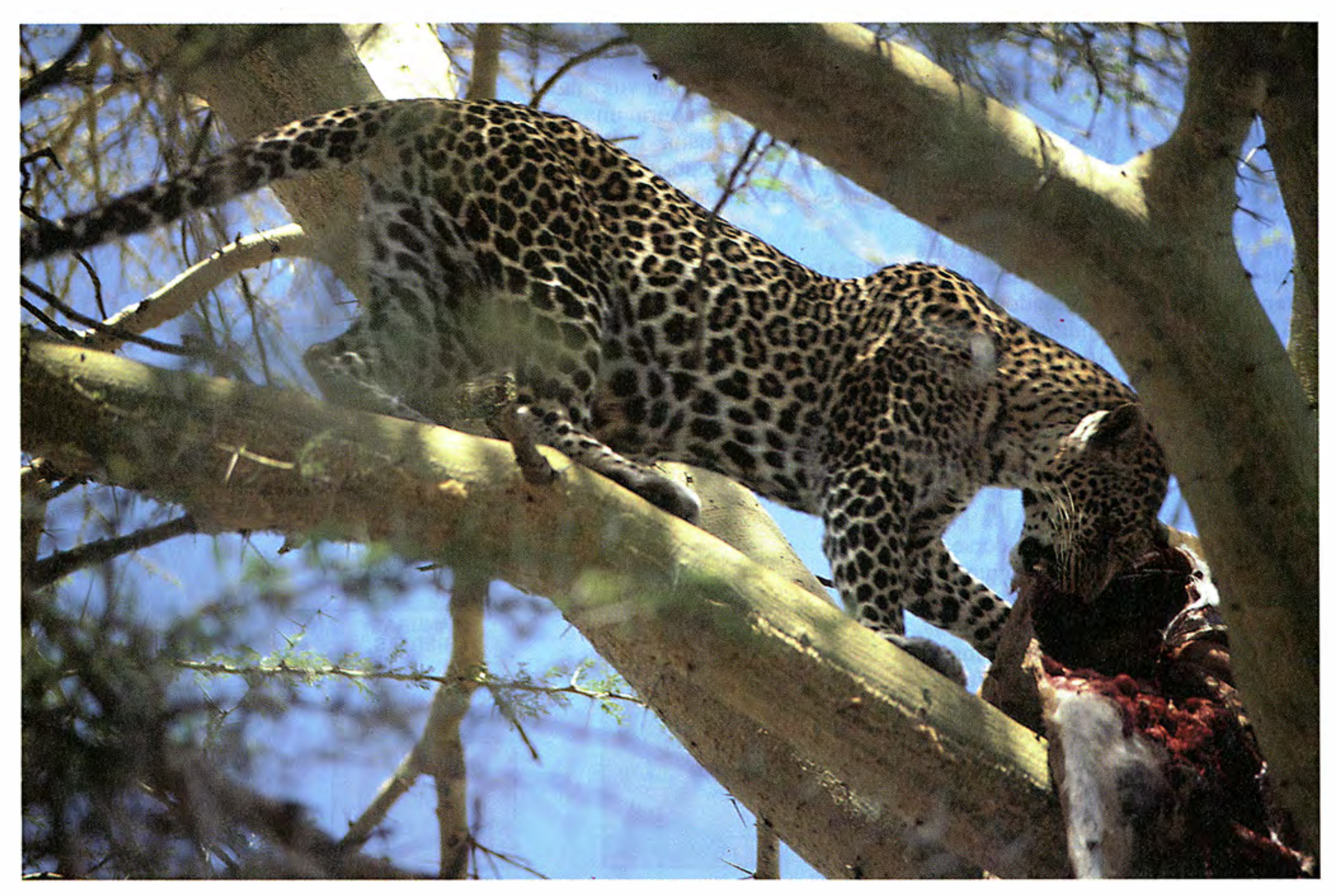
¿Qué fue primero, el carroñeo o la caza? Con fundamentos etológicos se han ido ofreciendo respuestas que no han tardado en ser cuestionadas por la aparición de nuevos datos. Se creía que la caza era una actividad únicamente humana hasta que Jane Goodall la descubrió en los chimpancés. El carroñeo era algo indigno de un primate hasta que se comprobó que chimpancés y babuinos arrebatan a guepardos y leopardos los restos de sus cacerías. Se supuso un hábito ajeno a la condición humana, hasta que, en 1988 y luego de un estudio etnográfico de veinte años de







4. LA DURACION DE LOS RESTOS APROVECHABLES varía en el Serengeti según el hábitat y el tamaño. Duran más los restos grandes que los pequeños, más los dejados en árboles que los abandonados en el suelo, y los escondidos entre el follaje ribereño, más también que los expuestos en los claros de bosques y sabanas.



5. LA DESPENSA DEL LEOPARDO guarda los restos de sus presas y los oculta a todas las miradas. Estos despojos, que pueden conservar carne además de tuétano, debieron ser apetecibles a los homínidos provistos de utensilios carniceros.

duración, se corroboró el ávido carroñeo que ejercían los naturales de las etnias hadza y san en el Africa subsahariana. Lo prolongado de la observación indica la magnitud del prejuicio contra el carroñeo.

Los primeros homínidos probablemente practicaban el carroñeo y atrapaban con sus manos presas pequeñas, como lo hacen chimpancés y babuinos. Pero fue exclusivo suyo el paso siguiente: empezar a servirse de útiles para trocear los despojos de grandes animales que los primates no humanos son incapaces de aprovechar. La dificultad de tal salto adelante desmiente la imputación de que el carroñeo no ofrecía estímulo alguno capaz de favorecer la selección de las cualidades humanas.

De nuestro trabajo de campo se deduce que el carroñeo no tiene nada de fácil para un primate lento, de poca talla y romos dientes. Para localizar restos antes que otros merodeadores, tuvimos que aprender a interpretar las diversas señales que indican la presencia de un cuerpo muerto entre las matas de los bosques ribereños: torpe volar casi a ras de tierra de un buitre aislado que, en hora temprana, se dirige precisamente hacia un cadáver; buitres posados a media altura y no en ramas cimeras del árbol en el que anidan; indicios que delatan un leopardo oculto o los restos de su festín colgados de una rama; mechones de pelo de ungulados o recientes marcas de zarpazos en la base de un árbol que sirve de comedero a un leopardo. Por la noche, la sonora "risa" de las hienas ante la carnaza fresca, el aterrorizado rebuzno de una cebra atacada, el gruñir de una ñu despavorida... todo ello sirve para saber dónde encontrar unos sanguinolentos despojos al despuntar el día.

Los primates superiores se trazan "mapas mentales" de su territorio y se valen de ellos para predecir dónde madurará la siguiente cosecha de frutos. Los homínidos quizás aplicasen tan oportuna capacidad a predecir la disponibilidad y la localización futura de las carroñas. A nosotros nos costó un gran esfuerzo conseguirlo: día tras día fuimos observando cuidadosamente los movimientos, los hábitos venatorios y alimentarios, y los tamaños de las panzas de varios depredadores, así como la actividad general de sus presas. Aparte los posibles beneficios obtenidos en la nutrición, los homínidos podrían haber utilizado rutinariamente tal información para evitar a los predadores.

La sociabilidad no habría, empero, progresado a no ser que el carroñeo influyese también selectivamente en pro de la cooperación del grupo. Los despojos capaces de alimentar a un solo individuo, sin dejar ninguna sobra que compartir, probablemente habrían alentado la competición. Pero si los resultados de nuestro trabajo son correctos y los restos de presas abandonadas por los grandes felinos ofrecían a los primeros homínidos abundancia de alimentos, entonces operaría el modelo citado de Isaac, relativo a la cooperación en la búsqueda, preparación y compartición de la comida. De modo similar, si tal alimentación de carroñas no hubiese coincidido usualmente con la ingesta de plantas, la incipiente sociabilidad podría haberse desarrollado hasta incluir la división del trabajo, con forrajeo colectivo en torno a una misma instalación hogareña. Si se quiere añadir incentivos y retos a nuestros antepasados, bastará suponer que hallarían en un sitio las carroñas y en otro las piedras aptas para su transformación en utensilios de carnicero. El reunir los útiles con los

objetos a que han de aplicarse habría, así, requerido gran capacidad de ordenación, seguimiento mental de los detalles y cooperación social.

Los chimpancés del Africa occidental son los únicos primates no humanos que tienen capacidad de ordenación suficiente para llevar útiles líticos hasta allí donde esperan encontrar comida, transportando pedruscos a modo de martillos y yunques para cascar las duras nueces de cola y pandán. Pero no se trata de distancias largas, mientras que *H. habilis* transportaba piedras hasta 10 kilómetros, y las nueces no son, ni con mucho, tan efímeras como las carroñas que los homínidos aprovechaban.

La destreza técnica necesaria para explotar la mayoría de las posibilidades de carroñeo se materializó en el conjunto de útiles de Oldowan, el más antiguo que se conoce: esquirlas de piedra afiladas para descarnar y descoyuntar, y guijarros apenas desbastados para partir calaveras y huesos en busca del encéfalo y del tuétano. Ni en ese conjunto, ni en los utillajes, más refinados, del período Achelense, que duró desde millón y medio hasta 200.000 años atrás, aparecen objetos que semejen armas.

Tales consideraciones nos llevan a la conclusión de que los homínidos de Oldowan pudieron haber creado un nicho de carroñeo que explicaría no sólo la acumulación más antigua de útiles y huesos de grandes mamíferos, sino también muchos de los rasgos humanos que se tienen por originados en la caza. La opción por el carroñeo pudo haberse iniciado para complementar el forrajeo, manifestándose en los estadios posteriores.

Los homínidos comenzarían, tal vez, a comer animales grandes mucho tiempo antes de que apareciese el *Homo*. Podría haber iniciado este hábito *Australopithecus,* cuando ocupó las sabanas y los bosques que se extendieron hace unos seis millones de años, a consecuencia del cambio climático mundial. Esos entornos abiertos ofrecerían mucho mejores oportunidades para el carroñeo que los tupidos bosques y selvas de los predecesores homínidos —hábitats donde los primates han permanecido hasta hoy.

Al tiempo que forrajeaban plantas en las estrechas franjas arbóreas de las riberas fluviales, los primeros homínidos se toparían con carroñas de descarnados despojos, y descubrirían que, para extraer el tuétano y la sustancia cerebral que encerraban, no había sino que machacarlas con toscos pedruscos. Este aprovechamiento carnicero de recursos tan ricos en energía y proteínas tal vez dejara un rastro que hasta ahora los arqueólogos no han conseguido encontrar, por haberse producido con anterioridad a la invención de los utensilios de piedra tallada, cuya manufactura deja una capa característica de esquirlas.

De ser así, los homínidos diurnos quizás empezaran a desbancar a las hienas, consiguiendo llegar los primeros a las carroñas, tesis abonada, hasta cierto punto, por la extinción de varias especies de hienas hace unos dos millones de años. La aparición de la tecnología del tallado de la piedra, alrededor de dos millones y medio de años atrás, permitiría a los homínidos incorporar un nuevo componente en el nicho del carroñeo de grandes mamíferos: a partir de entonces podrían obtener carne además de tuétano. Merced a la piedra tallada, los homínidos podrían empuñar versiones artificiales de los colmillos de los carnívoros, que desgarran las carnes de sus víctimas, y con tales útiles sacar toda la carne que quedara en los despojos escondidos en árboles por el leopardo. También tendrían acceso a la carne de presas mucho mayores, las de los felinos de colmillos de sable, observación ésta que nos induce a sugerir que acaso tuvieran algo que ver los homínidos con la extinción de esta especie de félidos hace aproximadamente un millón y medio de años. Quizá sea significativo el que en Europa y en las Américas persistieran estos grandes felinos más tiempo que en Africa, y que sólo se extinguieran después de iniciarse la colonización por homínidos de aquellos continentes.

Tal vez fuese antigua práctica de los homínidos, la caza de presas muy pequeñas y sólo el posterior desarrollo de las armas arrojadizas convirtiese al primitivo *Homo sapiens* en un depredador más capacitado que cualquier otro primate. Con todo, es probable que el carroñeo ejerciera un influjo sobre la evolución humana mucho más penetrante de lo que hasta la fecha se ha venido creyendo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SERENGETI LION: A STUDY OF PREDATOR-PREY RELATIONS. George B. Schaller. University of Chicago Press, 1976.

SERENGETI: DYNAMICS OF AN ECOSYSTEM. A. R. Sinclair y M. Norton-Griffiths. University of Chicago Press, 1984.

LAST DAYS IN EDEN. Elspeth Huxley y Hugo Van Lawick. Amaryllis Press, 1984.

ANOTHER UNIQUE SPECIES: PATTERNS IN HUMAN EVOLUTIONARY ECOLOGY. Robert Foley. John Wiley and Sons, Inc., 1987.

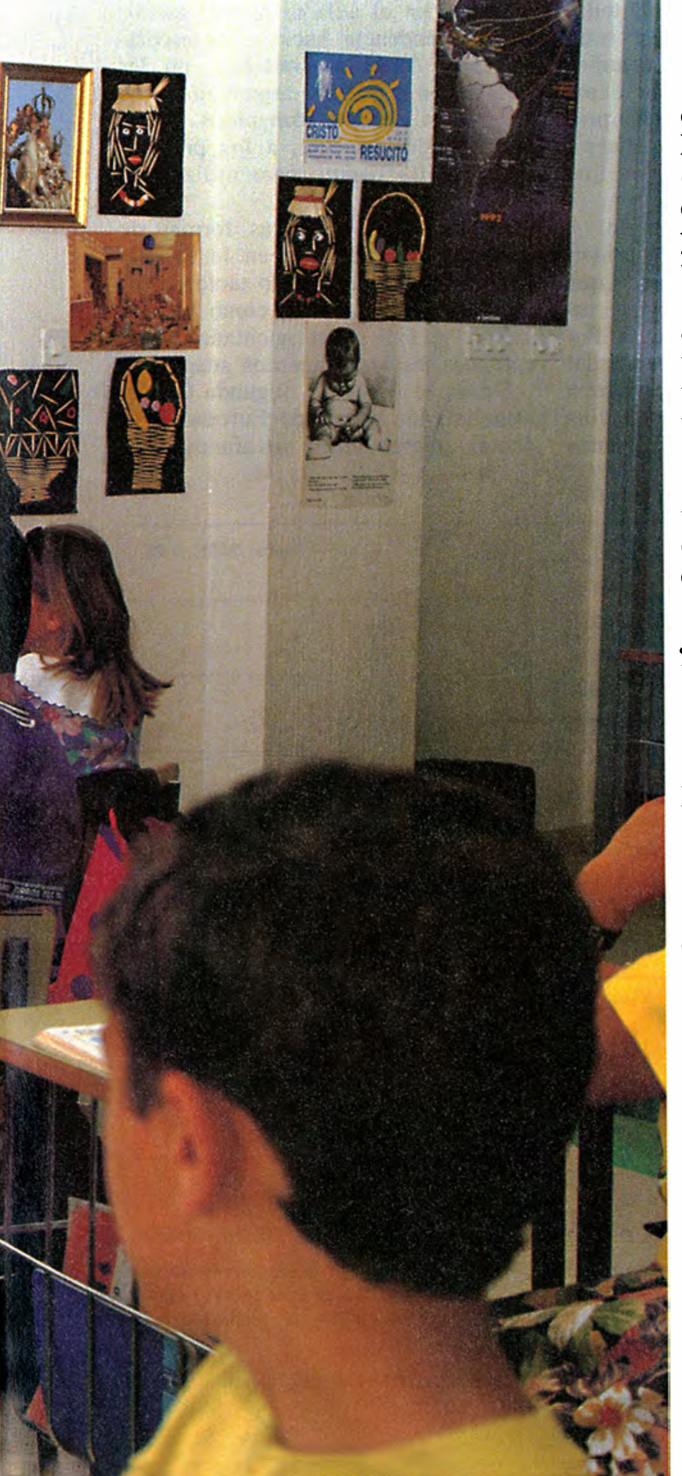
TRADICIÓN E INNOVACIÓN

Francesc Pedró

Pasada ya la época de la fe ciega en el valor de las inversiones educativas, e incluso superadas las ulteriores críticas que abogaban por una completa desescolarización, reaparecen algunas preguntas clásicas: ¿puede realmente la escuela hacer algo en favor de la



igualdad de oportunidades? ¿O bien debe concentrarse en la selección de una elite y en la búsqueda de la excelencia como motor del desarrollo y del progreso del país? ¿Ha descendido el nivel? Junto a éstas, surgen otras de nuevo cuño: ¿deberían gestionarse las escuelas con los criterios de la empresa privada? ¿Puede la escuela europea competir con la japonesa o con la estadounidense?



A pesar de su diversidad nacional y cultural, las escuelas de los países europeos comparten en gran medida una tradición educativa común, que arranca de la *paideia* griega y llega hasta nosotros tras haber experimentado las profundas influencias de la romanización, la cristianización y la incorporación creciente de la racionalidad y la ciencia modernas desde la Ilustración. Resultado de este largo proceso son una serie de esquemas generales sobre lo que debe enseñarse y aprenderse, el llamado currículo, así como de prácticas relacionadas con ellos, que constituyen el estrato básico y común del quehacer educativo de toda Europa.

El enfoque esencialista, heredero del *trivium* y el *quadrivium* medievales, propone que la escuela transmita los contenidos que, según los cánones del clasicismo, constituyen la esencia de la cultura; se encarna en instituciones escolares que conservan, aún hoy, nombres clásicos como *Gymnasium*, *lycée* o *grammar school*. Para el punto de vista enciclopedista, generador de otras cuya denominación apela a la modernidad (*Realschule* o *modern school*, por ejemplo), lo que debe enseñarse es todo el conocimiento humano disponible, especialmente el que proviene de la ciencia y de la experimentación porque nos acerca a la verdadera naturaleza del mundo. El énfasis sobre los saberes útiles para la vida productiva y económica caracteriza a la orientación politécnica, y se denomina pragmática a la que considera misión de la escuela preparar al individuo para su mejor desenvolvimiento en la vida cotidiana, con temáticas como la salud, el medio ambiente, el trabajo, la vida familiar, la participación civil, el ocio y la toma de decisiones morales.

Los sistemas educativos reales de cada uno de los países no responden, naturalmente, a ninguna de estas propuestas en exclusiva, sino que las combinan en diversa medida, algo que también sucede en los centros escolares concretos e incluso en la actividad de cada docente. Pero, por encima de estas diferencias, hace más de treinta años que lo que se estudia en la escuela europea es esencial-

mente lo mismo en todos los países. Es más, ni siquiera el tipo de gobierno de la nación parece introducir diferencias importantes en la forma de adaptarse a nuevas circunstancias o afrontar los problemas existentes. A decir verdad, en los últimos años los gobiernos conservadores y neoliberales, especialmente en los países con estructuras políticas descentralizadas, han reaccionado antes, adoptando medidas correctoras con mayor presteza. Pero lo cierto es que las estrategias son comunes también a los gobiernos de corte socialdemócrata, aunque aparezcan matices algo distintos en las exposiciones de motivos. El producto resultante es, también en el terreno educativo, notablemente parecido y equivalente.

En términos generales, tal currículo europeo se vertebra sobre una organización del conocimiento por materias, con incorporación progresiva de los avances en cada una de ellas, por lo que responde mejor a estos cambios que, pongamos por caso, a los progresos de la psicopedagogía. ¿Será acaso por ello por lo que se habla de crisis en la educación?

Es difícil saber por qué, pero la educación parece haber estado siempre en crisis. Hace ya algunos decenios, muchos de quienes nos dedicamos profesionalmente a estudiar los fenómenos educativos fuimos formados en la común creencia de que la educación estaba atravesando una crisis profunda. Nosotros seguimos transmitiendo esta misma opinión a nuestros discípulos. Es más, seguimos recomendando la lectura de *La crisis mundial de la educación*, obra de Philip Coombs, uno de los miembros fundadores del Consejo Internacional para el Desarrollo de la Educación, cuyas sucesivas versiones, desde su aparición allá por 1968, la han convertido en el más claro *bestseller* pedagógico.

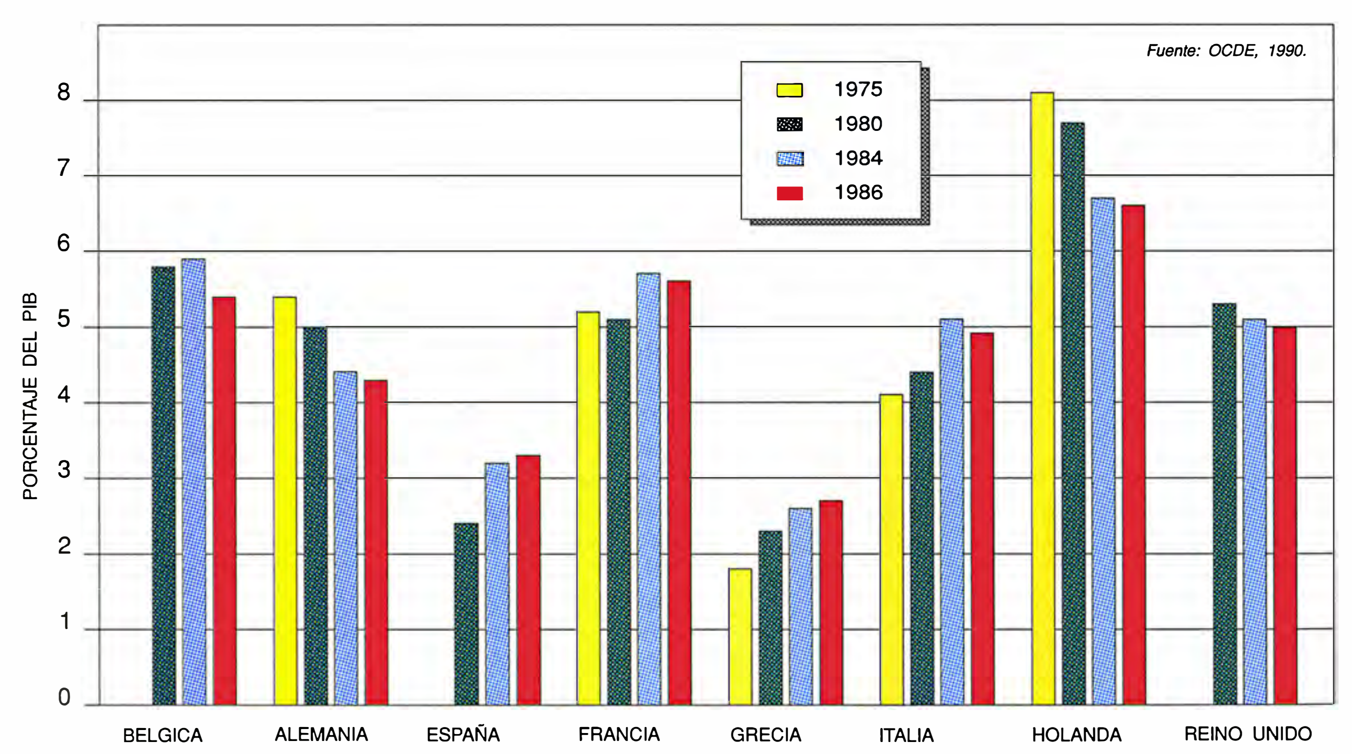
Puede que todo se reduzca a que la naturaleza misma del proceso educativo (que implica a un educador, a un educando y a unos contenidos que aquél pretende que este otro, no siempre de buen grado, aprenda) sea de por sí suficientemente problemática, como lo son, en general, todas las relaciones humanas. En todo caso, en el terreno de los estudios prospectivos de educación la experiencia demuestra que tiene más probabilidades de acertar quien apueste por tendencias conservadoras que quien prefiera aventurarse.

Bastará con tomar un ejemplo. A finales de los años sesenta y principios de los setenta parecía claro que en poco tiempo se impondrían las teorías de los defensores de la llamada desescolarización, es decir, del abandono de las estructuras escolares tradicionales en favor de nuevas fórmulas, mucho más flexibles y menos académicas, en las cuales el profesor ejercería sobre todo de acompañante, de pedagogo, en el sentido original del término griego. En este nuevo orden educativo, al decir de E. Reimer o de Iván Illich, las nuevas tecnologías se ocuparían de la transmisión de contenidos, de la mera instrucción, y lo esencialmente educativo sería la relación con los compañeros y con los adultos.

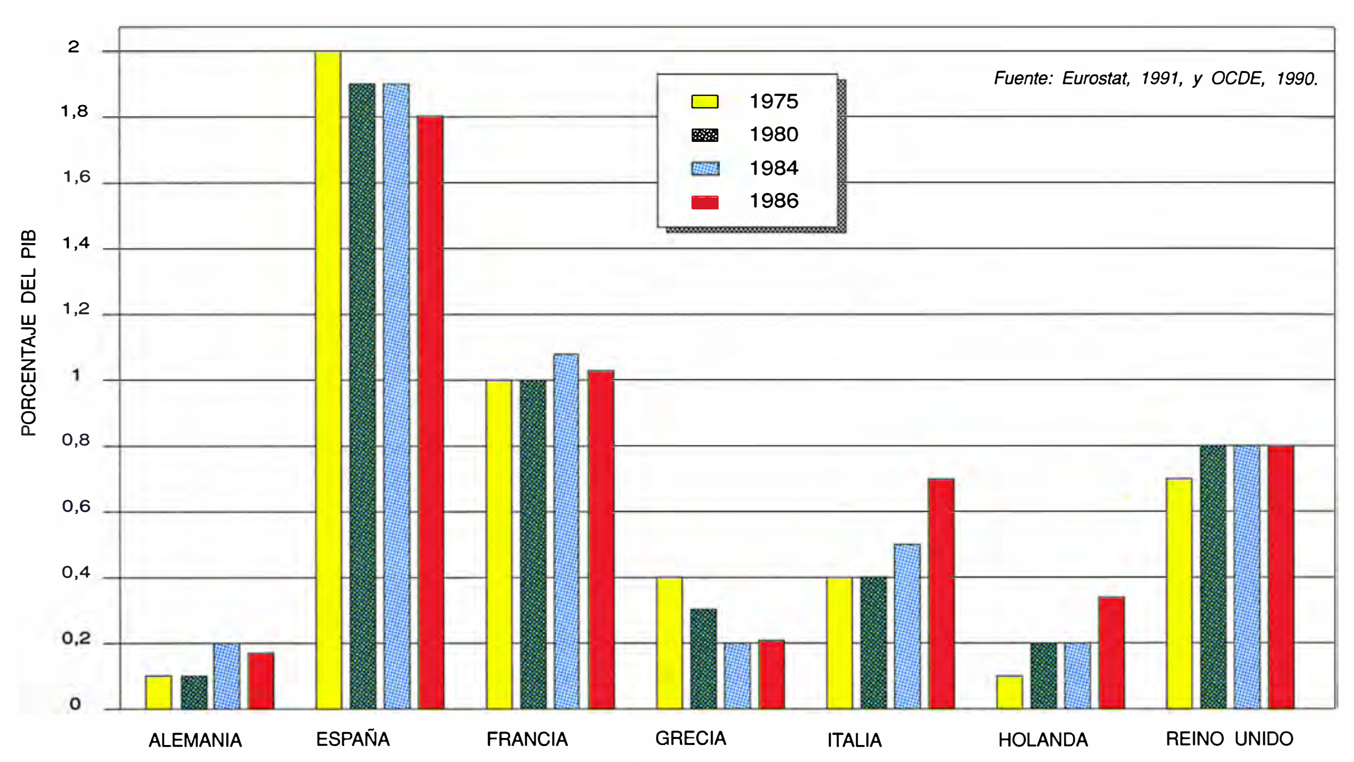
Algo de esto se ha cumplido: en los países de la Europa comunitaria es prácticamente imposible encontrar una escuela pública en la que no haya ordenadores o aparatos audiovisuales con alguna aplicación didáctica; sin embargo, no parece que esta presencia se haya traducido en un cambio significativo del papel de los docentes en el aula ni mucho menos en una tendencia hacia la desescolarización. Antes al contrario, no les falta razón a quienes argumentan que la presión de los contenidos es tal que, paradójicamente, a los profesores les falta tiempo para utilizar estos nuevos métodos.

En cualquier caso, las formas de enseñar y de aprender en la escuela europea no han cambiado tanto en los últimos cincuenta años como la evolución técnica experimentada desde entonces pudiera hacernos sospechar.

Desde el fin de la Segunda Guerra Mundial, los países de Europa Occidental emprendieron un afanoso tra-



1. EVOLUCION TEMPORAL del gasto público destinado a educación en determinados países comunitarios, medido como porcentaje de su producto interior bruto. Junto a importantes disparidades, se observa un doble movimiento de aproximación hacia una cota media de alrededor del 5 por ciento: de crecimiento en los países de menor gasto y de reducción en los que gastaban más.



2. EL GASTO en educación incurrido directamente por las familias (gasto privado) tiende a guardar una relación inversa con el gasto público del país correspondiente. Aunque son cifras más difíciles de computar que las públicas, el gráfico recoge las estimaciones del gasto privado en algunos países europeos, en muchos de los cuales su tendencia reciente es a aumentar.

bajo de reconstrucción nacional, que tenía en la escuela una pieza clave. Nunca hasta entonces se había asistido a un cúmulo semejante de esfuerzos para propagar los ideales y los valores democráticos ni para lograr la reconstrucción moral y económica de Europa. El crecimiento de la natalidad que se produjo por entonces exigió grandes inversiones en materia de construcciones escolares, de maestros, de libros y materiales didácticos, las cuales, afortunadamente, resultaron posibles durante un período de bonanza económica. La teoría del capital humano contribuyó a extender la común creencia de que la riqueza de los países dependía, en último extremo, de su capacidad para invertir en educación, en la formación de este capital humano. Pero nadie se preocupó entonces de evaluar el rendimiento de estas inversiones, de la misma manera que no se insistía en que el crecimiento económico dependía en exceso de un precio muy favorable del petróleo importado, como la crisis de mediados de los setenta vino a recordarnos.

Por esta razón, los planteamientos actuales del desarrollo no comulgan con la ciega euforia inversionista en educación propia de los años sesenta. La educación europea no responde, hoy por hoy, a las esperanzas, circunstancias ni problemas de años atrás: ni desde el punto de vista de la socialización (relevancia de temas como la violencia, la drogadicción o el "pasotismo"), ni desde el del desarrollo cultural y científico (pérdida del liderazgo europeo en materia científica y tecnológica), ni tampoco desde el punto de vista económico. Si, como se cree, no es posible enseñar algo muy distinto de lo que actualmente se enseña en la escuela, puede que el problema esté en la manera de enseñarlo y, sobre todo, en la escasa preocupación por los resultados y la evaluación.

Hoy, en el contexto comunitario, los políticos, los empresarios y, por supuesto, las familias sostienen que algo no funciona, que la correspondencia entre sociedad, cultura, economía, ciencia, técnica y escuela no es la deseable, que la educación europea debe, en suma, cambiar para superar la crisis en que se halla sumida. Por su parte, los docentes creen más bien que la crisis es, por encima de todo, el resultado de la recesión económica y de la pérdida de la fe en los beneficios de las inversiones educativas.

La cuestión económica

Tras los esfuerzos realizados para mejorarla, la educación presenta ahora a los administradores públicos la apariencia de un pozo sin fondo; al igual que sucede con la sanidad, sus demandas, cuantitativas y cualitativas, son siempre crecientes y nunca se logra satisfacerlas por completo. El Estado se ve sobrecargado por estas y otras necesidades sin que sus recursos alcancen para ello. La solución lógica consiste en establecer prioridades para el gasto público, por lo que la educación tendrá que competir con otros posibles destinos cuyos resultados aparentan estar mucho más al alcance de la mano, son más visibles y, en última instancia, se dirá, tanto o más necesarios a corto y a largo plazo. En los países comunitarios, la educación ha dejado de ser la prioridad de las prioridades y han ocupado su lugar otras preocupaciones como el desempleo, la incorporación de los jóvenes a la vida activa, la protección social o la conservación del medio ambiente.

Todos estos factores han hecho que, en los últimos años, la tendencia del gasto público en educación haya sido decreciente en la mayor parte de los países, si no en valor absoluto sí en términos relativos. En la misma dirección van las consecuencias de las medidas de convergencia económica tomadas por los Doce en Maastricht. Un estudio prospectivo de la OCDE muestra que, en los próximos cincuenta años, el coste total del gasto social se incrementará en un tercio, en términos reales, pero no afectará por igual a

los distintos sectores afectados: frente a un aumento del 40 por ciento en el gasto sanitario y una duplicación del coste de las pensiones, los gastos originados por las prestaciones familiares y la educación experimentarán reducciones del 15 y el 20 por ciento, respectivamente. Es la primera vez que nadie se atreve a predecir que llegará el día en que el gasto público en educación disminuya de forma tan tajante.

Pero los efectos de lo que parecía una crisis económica coyuntural son mucho más importantes que una simple reducción monetaria o porcentual, pues implican una nueva concepción del papel del Estado en la provisión de los servicios públicos. Los contribuyentes muestran su insatisfacción por el deterioro de estos servicios, que no se atribuye sólo a factores tales como la pérdida de poder adquisitivo de los funcionarios, con el consiguiente descontento y desinterés, sino a la incapacidad, algunos dirán que congénita, del Estado para dispensarlos de forma satisfactoria y eficaz. Se ha impuesto un nuevo *ethos*: el Estado y todos sus órganos tienen que justificarse, rendir cuentas y someter a evaluación los resultados conseguidos.

En su vertiente educativa, esta actitud aparece a finales de los años sesenta en los Estados Unidos, bajo el término de *accountability*, y a finales de los setenta, muy esporádicamente, en el continente europeo. Se acostumbra recordar, en este sentido, el impacto de la conferencia que el primer ministro británico James Callaghan dictó en el Ruskin College de Oxford, en octubre de 1976. En ella se ponía de relieve la necesidad de demostrar fehacientemente que la calidad de la educación iba en aumento y que de ningún modo se estaba produciendo un descenso en los niveles académicos. En suma, se venía a postular que los responsables de la educación debían estar en condiciones de rendir cuentas ante la comunidad. La idea de que el sistema educativo ha de ser evaluado como si fuese una empresa pública y con los mismos criterios aplicables a las restantes empresas públicas se acepta hoy en la práctica totalidad de los países desarrollados, aunque los efectos prácticos sobre su funcionamiento aún estén pendientes de comprobación.

En principio, esta exigencia surge por los problemas derivados de la puesta en práctica de políticas educativas progresistas durante la década de los setenta, tales como los programas de igualdad de oportunidades o de lucha contra la discriminación racial. Debe mucho al hecho de que la educación tenía asignada una prioridad muy alta, sobre todo en un nivel retórico: se establecían finalidades humanitarias de carácter vago, justificadas en nombre de beneficios económicos igualmente imprecisos.

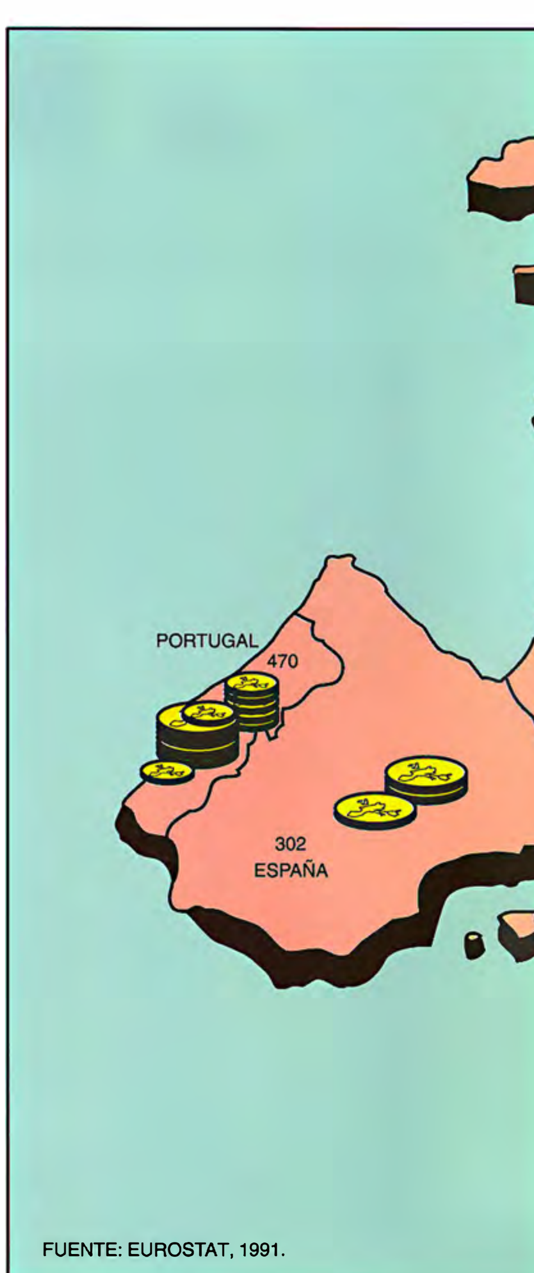
Posteriormente, a finales de los ochenta, su lógica entra a formar parte de los requisitos bajo los que se supone que debe funcionar el Estado y, por ende, sus distintos brazos. El resultado final es más amplio y complejo que el simple examen de los procesos y los productos educativos, pues cuestiona, en última instancia, quién debe determinar sobre qué debe rendirse cuentas, de qué modo, quién debe rendirlas y ante quién.

Los cambios sociales y sus implicaciones educativas

Una segunda faceta de la crisis es de carácter estructural, de ajuste de los sistemas educativos a un nuevo contexto social, económico, tecnológico y, en cierta medida, también demográfico. Aunque, en términos absolutos, las cifras de población europeas estén prácticamente estancadas, los sistemas educativos crecen por la incorporación de nuevas clientelas que hasta bien recientemente contaban poco.

Así, la incorporación de la mujer a la vida laboral activa es un fenómeno iniciado alrededor de la década de los sesenta, acaso más tardíamente en la Europa meridional, que se traduce en la lógica demanda de educación, concebida ahora como mecanismo de promoción profesional y de movilidad social. La proporción de mujeres estudiantes en los distintos niveles educativos mantiene una tónica de crecimiento constante en los diez últimos años. En lo que respecta a los niveles preescolar, obligatorio y secundario superior, el porcentaje de mujeres equivale al de hombres en prácticamente todos los países de la Europa comunitaria, pero en la educación superior, sobre todo en los dominios de las carreras científicas y técnicas, todavía queda mucho camino por recorrer. Y no se trata solamente de una cuestión cuantitativa. Hay que adaptar los contenidos de la educación a una visión de la sociedad que reafirme la igualdad de derechos entre hombre y mujer y no transmita concepciones sexistas o sesgadas.

Parecidas exigencias plantea la inmigración procedente de otros países, en especial del Este europeo y del Magreb. En Francia, el Reino Unido o Alemania, la inmigración extranjera y la pluralidad étnica y cultural no son fenómenos nuevos, pero sí lo es su magnitud actual. Además, en una época de recesión económica, las actitudes racistas y xenófobas tienden a acrecentarse. A todo ello debe darse respuesta en las aulas. Por ello veremos aumentar en los próximos años los programas escolares de educación multicultural, tanto para favorecer la integración de los hijos de los inmigrantes extranjeros, garantizándoles además el conocimiento de su cultura y lengua originarias, como para preparar a los hijos de los ciudadanos nacionales para vivir en un mundo más abierto,



3. OTRA PERSPECTIVA de los recursos destinados a educación en Europa:

alejándoles de la fácil tentación del etnocentrismo.

Tampoco podemos olvidar el hecho de que, en conjunto, la población europea está envejeciendo. Desde el punto de vista de la educación, esto podría ser incluso beneficioso, puesto que la disminución de la población en edad escolar permitiría reducir el número de alumnos por profesor sin variar el nivel de gasto. Pero es difícil que ésta sea la tendencia. Por una parte, una población envejecida presenta necesidades específicas (pensiones, atención médica) que entran en competencia con el gasto educativo. Por otra, exige para sí misma una renovada atención pedagógica, un aprovechamiento educativo del tiempo libre, sobre todo con vistas a ampliar los horizontes culturales.

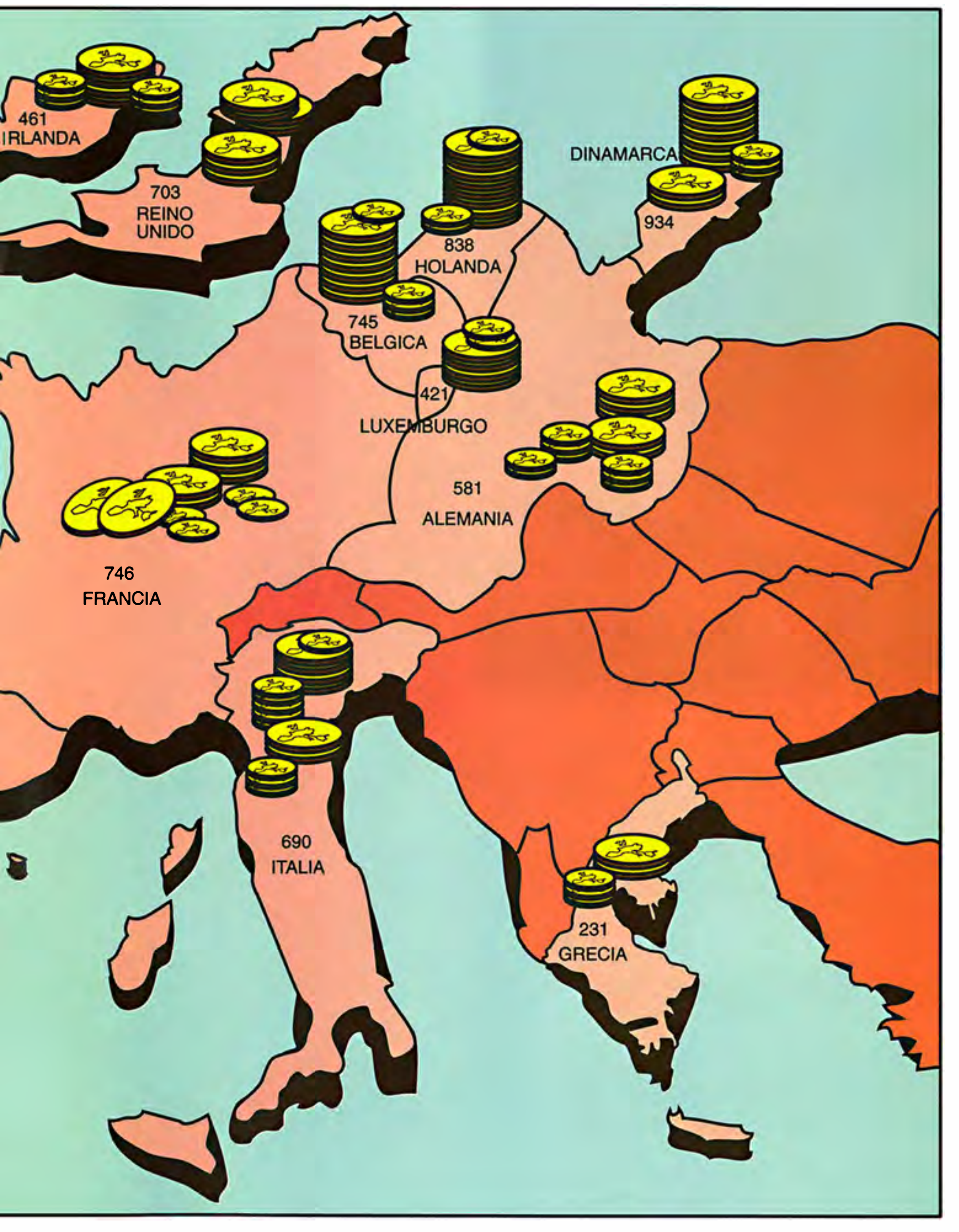
Pero el frente más amplio y conflictivo de la interacción escuela-sociedad es, sin duda, el relacionado con la capacitación laboral. La drástica disminución del número de puestos de trabajo disponibles para personas no cualificadas y las exigencias crecientes de preparación para los demás han convertido el tema del empleo en uno de los más sensibles de las sociedades desarrolladas, por lo que se perciben con suma claridad las deficiencias del sistema educativo en lo que respecta a sus relaciones con el mundo laboral. No se trata sólo de la formación de los jóvenes para que puedan acceder a su primer empleo, sino también de proporcionar una formación permanente a las personas ya empleadas para aumentar su adaptabilidad, polivalencia y movilidad.

El debate sobre la responsabilidad del sistema educativo en la preparación adecuada de los jóvenes para su entrada en el mercado laboral se complica en el caso de quienes, por determinadas razones, no logran siquiera hacerse con una cualificación, sea académica o profesional, y abandonan la escuela en un estadio relativamente precoz, lo cual se traduce en una mayor indefensión ante la reducida demanda ocupacional. No cabe excluir que estos abandonos se deban, en alguna medida, a determinadas características del propio sistema educativo y sus mecanismos concretos de funcionamiento.

Este grupo residual o de riesgo es objeto de diversas políticas prioritarias en los países europeos. Aunque se consiga la disminución progresiva del número de estos jóvenes gracias al refuerzo y a la expansión de la formación postobligatoria, existen unos límites probablemente irreductibles que afectan a los más desfavorecidos y menos dotados académicamente. Estos jóvenes optan mayoritariamente por entrar en el mercado laboral después de nueve o diez años de escolaridad obligatoria y los esfuerzos que habrán de realizar las administraciones educativas de sus respectivos países para convencerlos de que la formación postobligatoria no es un aparcamiento temporal sino una verdadera salida a corto y medio plazo a su falta de empleo serán necesariamente importantes.

Un nuevo horizonte político para Europa

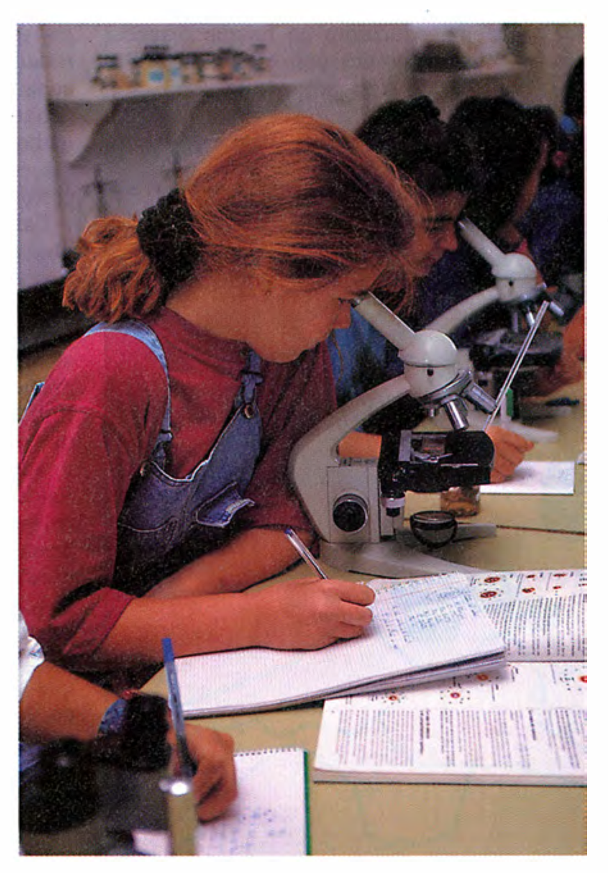
Los países de la órbita comunitaria tienen ante sí la efectiva realización de la Unión Europea, es decir, la libre circulación de capitales, de mercancías y también de personas por todo el territorio comunitario. Las implicaciones educativas de esta unidad no han sido estudiadas con demasiado detalle hasta el momento. Sabemos a ciencia cierta que, en sus orígenes, el proyecto comunitario no tuvo prácticamente en cuenta el fenómeno educativo, al ser sus razones últimas económicas y políticas. Hoy en día, tras la ampliación de sus horizontes, incorpora el máximo respeto a la diversidad de tradiciones culturales, lo que impide pensar en una homogeneización de los contenidos, estructuras y métodos de los



el gasto público en educación por habitante en cada país, medido en EPA (estándar de poder adquisitivo), una unidad ficticia que homogeneíza las comparaciones.

distintos sistemas educativos en una especie de escuela paneuropea. Así se acaba de expresar en los acuerdos de Maastricht sobre la convergencia europea. Más bien se busca crear algo parecido a una sinfonía de sistemas diversos, que dé como resultado, si no música, al menos un sonido armónico.

Sin embargo, la Comisión ha hecho esfuerzos considerables en educación superior y en formación profesional para garantizar que la diversidad de sistemas educativos y, por ende, de titulaciones académicas y profesionales, no sea un obstáculo para la realización del principio de la libre circulación de trabajadores. Para ello se han creado mecanismos legales e institucionales que facilitan el reconocimiento mutuo de titulaciones y su convalidación. Además, la Comisión promueve programas de intercambio de estudiantes y de escolares con el fin de acrecentar el conocimiento mutuo entre distintos países, programas para fomentar el aprendizaje de otras lenguas europeas y, por último, aunque no en último lugar, para introducir la llamada dimensión europea en los programas escolares de todos los países comunitarios. El énfasis en el aprendizaje de lenguas extranjeras, y el añadido de las estancias en el extranjero durante períodos más o menos cortos generalmente coincidentes con las vacaciones escolares, ya hace años que forman parte de los requerimientos imprescindibles de cualquier escuela europea que se precie.



Pero incluso la dimensión exclusivamente económica del proyecto comunitario tiene implicaciones educativas que no han pasado desapercibidas. Las grandes multinacionales europeas y las organizaciones patronales han resaltado en repetidas ocasiones que la supervivencia de Europa como algo más que un museo de la cultura occidental depende, en buena medida, de las posibilidades de hacer frente a la competencia que representan Estados Unidos y Japón. Uno de los factores claves de esta competitividad es, precisamente, la formación, y no sólo la profesional especializada sino la misma formación básica obligatoria. Es necesario disponer de mayor número de técnicos y científicos y de una mano de obra cualificada y polivalente.

No parece, empero, que la educación científica y técnica sea la más atractiva, hoy por hoy, para los estudiantes europeos. La sociedad misma se encuentra indecisa a la hora de precisar el propósito fundamental del proceso educativo en su conjunto y de optar entre la escuela tradicional, basada en la cultura clásica, y otra orientada a conocimientos más empíricos y utilitarios, como se pone de manifiesto en las polémicas que se producen siempre que se emprenden reformas de los distintos planes de enseñanza.

Consideremos ahora los distintos principios orientadores que se aplican al afrontar este conjunto de necesidades, condicionamientos y problemas, pues son los que previsiblemente determinarán los rasgos de la educación europea en el futuro inmediato.

Un gobierno descentralizado de la educación

La adecuada respuesta a la variedad de demandas que actualmente recibe el sistema educativo impone como uno de sus rasgos definitorios la flexibilidad y capacidad de adaptación, lo que implica, al igual que en otros ámbitos del servicio público, el acercamiento entre quien dispensa los servicios y quien los recibe. Esta redistribución de los poderes de decisión y de gestión entre los organismos centrales y periféricos es a la que aluden los conceptos de descentralización y desconcentración.

Según Brian Holmes, catedrático emérito del Instituto de Educación de la Universidad de Londres, es imprudente afirmar de manera categórica que un sistema de administración de la educación sea o centralizado o descentralizado, pues la asignación de responsabilidad para la formulación, adopción y ejecución de las políticas suele depender del nivel y del tipo de enseñanza. Así, por ejemplo, el fuerte peso conferido a los municipios en materia de enseñanza primaria (ya sea en la fijación del currículo, la financiación de las escuelas o ambas cosas) hace que, en países como Dinamarca, Holanda o Irlanda, no pueda hablarse propiamente de estructura administrativa centralizada.

Antes de que la tendencia se generalizase en los años ochenta, muchos países ya habían desarrollado actuaciones descentralizadoras. La tradición de autonomía municipal es antigua en Bélgica y a ella se unieron después las reivindicaciones de carácter lingüístico. Cada una de las dos comunidades (flamenca y valona) cuenta con un Consejo Cultural y un Ministerio de Educación propios. La situación evoluciona hacia una mayor relevancia de provincias y municipios, aunque aspectos organizativos sustanciales (líneas básicas del plan de estudios, sueldos, subvenciones, etc.) siguen centralizados. En 1970 se inició en Italia una regionalización administrativa que, sin embargo, no ha tenido por el momento demasiadas consecuencias, salvo en el ámbito de la formación profesional, enteramente regionalizada. Los llamados *provveditori agli studi* existentes en las provincias tienen funciones que, si bien han aumentado de forma considerable en los últimos tiempos, siguen siendo delegadas y ejecutivas. En Francia, todas las decisiones fundamentales relativas a la enseñanza obligatoria (planes de estudios, nombramientos de profesorado y de personal directivo y de inspección, localización de escuelas, etc.) parten del Ministerio de Educación Nacional, aunque un reciente movimiento de desconcentración funcional ha hecho que cobren cada vez

más importancia el Departamento y el Inspecteur d'Académie, director de los servicios departamentales de enseñanza. A la vez se ha reconocido un espacio para la presencia de las lenguas minoritarias como el vasco o el catalán en los programas escolares.

En la Europa meridional, el país que está viviendo un proceso de cambio administrativo más sustancial es España. La estructura administrativa básica es centralizada, pero la educación, en todos sus niveles, se ha transferido a varios gobiernos regionales autónomos, como los de Cataluña, País Vasco, Galicia, Andalucía y Valencia, y los restantes cuentan también con que les sea transferida. En cada una de estas Comunidades suele haber una Consejería de Educación y algunas han creado un aparato administrativo propio de cierta envergadura, que, curiosamente, suele mostrar en su ámbito un talante centralizador. El Ministerio de Educación y Ciencia sigue conservando importantes cometidos, como los referentes a la ordenación general del sistema educativo, al currículo o la alta inspección.

El proceso conlleva sus propias dificultades, en especial la de determinar quién será el principal destinatario del poder transferido, por el que compiten las autoridades regionales y locales, los centros de enseñanza en cuanto tales, los claustros o equipos docentes e incluso los propios profesores a título individual. Por otra parte, en muchos países la preocupación por la mejora de la calidad de la enseñanza está actuando como una fuerza de signo opuesto, mediante el establecimiento de objetivos nacionales precisos y mínimos a lograr, o bien por la creación de complejas matrices de evaluación de los resultados académicos. No es infrecuente que las autoridades centrales utilicen la asignación de mayor responsabilidad a los consejos de los centros escolares en detrimento de las competencias de las autoridades locales, como ha sucedido en el Reino Unido y en Suecia.

Privatización

Este término puede sintetizar una segunda dimensión de cambio en la forma de prestar los servicios públicos, entre ellos el educativo. La común creencia de que el Estado, antes Estado del Bienestar, es incapaz de superar sus límites actuales en lo que a calidad y cantidad de servicios ofrecidos a la ciudadanía se refiere, hace que amplios sectores vean en el retorno a la ética del libre mercado una eventual solución. No es extraño, pues, que en determinados países el sector público considere seriamente el refuerzo que pueda prestarle la red privada.

Por lo pronto, en todos los países comunitarios existe tradicionalmente un sistema educativo privado, al que las familias dedican unos recursos que suelen estar en proporción inversa a los dedicados por el sector público (véase el gráfico). En muchos de ellos, la dualidad escuela pública frente a escuela privada ha sido el centro de numerosos debates políticos y el punto de partida de graves crisis, pero no parece probable que se reproduzcan ahora las llamadas guerras escolares de Bélgica, Francia, España, Italia o los Países Bajos con los rasgos de ideologización que las caracterizaron en su momento. Lo que se busca actualmente es estimular la aparición de mejoras e innovaciones, así como garantizar la existencia de un amplio abanico de alternativas (ideológicas, religiosas, metodológicas) para que las familias ejerciten el derecho a la libre elección de centro escolar.

En la práctica, nadie defiende en los países industrializados la privatización del servicio público de la educación en el sentido de abrirse a un mercado puro. Más bien se trata de ganar para él los beneficios de una gestión privada, de los que los principales serían la capacidad de medir sus resultados en términos de eficacia y la adopción de nuevas reglas de juego para su prestación, tales como la competitividad. No conviene olvidar a este respecto que una de las razones más comunes para optar por las iniciativas no públicas es, sencillamente, instrumental: a los ojos de las familias europeas, el proyecto educativo de las escuelas privadas parece más claro y definido, al tiempo que comporta unos mecanismos de autoridad y de supervisión, tanto de los alumnos como de los profesores.

Tampoco desde el punto de vista financiero se trata de una escisión radical. Al pagar sus impuestos, los ciudadanos ya han sufragado su cuota para obtener educación y, si ésta no se presta en centros públicos, todo o parte de ella habrá de recuperarse. Es decir, el Estado tiene que subvencionar la iniciativa privada.

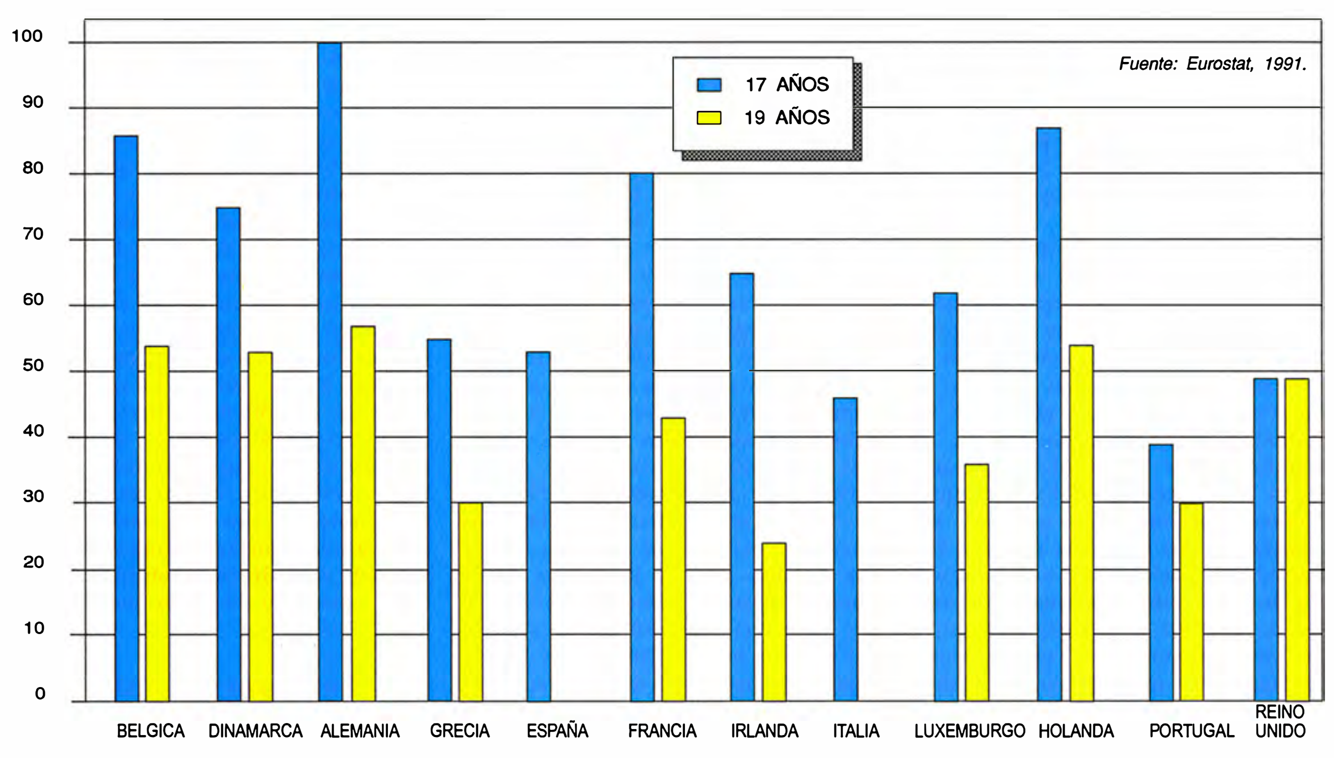
Para hacerlo caben dos alternativas. La primera y más directa consiste en financiar al individuo: dar a los padres la cantidad de dinero equivalente a lo que se gasta por término medio en educación por alumno en el sector público y dejar que sean las familias las que compren, por así decirlo, la educación que quieran o necesiten para sus hijos. Ya sea bajo la forma de "vouchers" (bonos), cheques escolares o certificados, ya se trate de una cantidad preestablecida que demanda el cumplimiento de determinadas condiciones, esta alternativa ha resurgido con fuerza, especialmente en el Reino Unido y en los Estados Unidos.

Otra forma es subvencionar directamente a los centros, lo cual constituye la opción mayoritaria. El Estado exige, a cambio, un cierto número de contraprestaciones, garantías y controles a fin de, por un lado, asegurar que los centros privados subvencionados cumplan los estándares de calidad requeridos y, por otro, velar por el buen uso de los fondos públicos.

Una tarea que exige mayor participación

La ebullición social y política que se produjo en los Estados Unidos y en Europa a finales de los años sesenta y principios de los setenta, unida a teorías pedagógicas antiautoritarias, cuando no claramente desescolarizadoras, pusieron de relieve la necesidad de abrir las puertas de los centros escolares al mundo exterior, para alejar el peligro de divorcio entre la escuela y la vida real. Una de sus consecuencias ha sido el cambio progresivo de los modelos de dirección y gestión de los centros educativos para otorgar, por lo pronto y al menos en apariencia, un nuevo protagonismo a profesores, familias y estudiantes, en detrimento del poder ejercido por el Estado, ya directamente (planes de estudio, exámenes de reválida) o indirectamente a través de sus representantes en el centro (dirección e inspección).

Por estas y otras razones, distintas formas de colaboración de los padres en la vida y en la gestión de las escuelas han recibido un cierto impulso en los últimos años. En el Reino Unido, el Taylor Report (1977) planteó la necesidad de que cada escuela tuviera su propia junta de gobierno para que se considerasen los deseos y sentimientos de las familias y de la comunidad local y sugirió que la representación de los padres en ellas fuese de la cuarta parte del total de sus miembros. Una ley de 1980 lo convirtió en norma y otra de 1988 acrecienta el papel de los padres en detrimento, no del Estado, sino del poder de las autoridades locales. En Francia, la participa-



4. TASAS PORCENTUALES de escolarización de los jóvenes europeos a los 17 y a los 19 años de edad.

ción de los padres en el consejo escolar ha sido igualmente asegurada, así como la del alcalde y otros representantes de la comunidad local. En España la legislación anterior a 1985 establecía ya como obligada la participación de un determinado número de padres en los consejos escolares; posteriormente, esta obligación se ha visto reafirmada y en los consejos se reúnen profesores, padres y representantes de la autoridad local, además de algunos alumnos de los cursos superiores. Con competencias más o menos decisivas, en prácticamente todos los países europeos existen órganos que aseguran una participación semejante.

Pero el concepto de comunidad educativa se ha ampliado también a los agentes sociales y económicos. Unas exageradas tasas de desempleo juvenil, que llegaron a rozar el 50 por ciento en los países de Europa meridional mientras se notaba la falta de personal cualificado en determinadas áreas, pusieron de manifiesto que, más allá de los efectos directos de la crisis económica, existía latente otra crisis previa de ajuste de los sistemas educativos a la realidad sociolaboral, económica y tecnológica. El desarrollismo de los años sesenta había ocultado la verdadera dimensión del problema absorbiendo, sin apenas dificultad, el producto egresado de los sistemas educativos. Mas, cuando las demandas se restringen, se vuelven más selectivas y, junto a los problemas de orden cuantitativo, se hacen evidentes los desajustes cualitativos y se cuestiona el producto ofertado por los sistemas formativos.

El recurso a los agentes económicos se considera hoy imprescindible, sobre todo en los niveles más cercanos al mercado laboral, es decir, la formación profesional y la educación superior. Los gobiernos no sólo han tenido que aceptar esta participación en detrimento de algunas de sus competencias, sino que han de fomentarla, con el consiguiente coste económico, generalmente en forma de desgravaciones fiscales.

El diseño, puesta en práctica y evaluación de la formación profesional no pueden hacerse ya en Europa sin contar con los empresarios, los sindicatos y las autoridades locales o regionales. Las prácticas en las empresas vuelven a ser uno de los componentes importantes de la oferta de formación profesional en muchos países. En Alemania, donde siempre han tenido un papel decisivo, el Estado ha garantizado incentivos a las empresas que aumenten el número de plazas de aprendices de acuerdo con la demanda de lugares de trabajo. En Francia e Italia se ha procedido a su revisión y refuerzo últimamente; se tiende a atender con ellas las necesidades de formación del 15 por ciento de los jóvenes de 16 a 18 años de edad. En los Países Bajos se espera que el número de aprendices del mismo grupo de edad se doble en el próximo decenio hasta llegar a un 20 por ciento. En el Reino Unido, sin embargo, la importancia de las prácticas en el contexto de la formación escolar ha tendido a la baja desde 1975, por haberse transferido a programas no académicos.

Más allá de las prácticas, el objetivo de asegurar que los contenidos de los programas de formación técnicos y profesionales se adecuen continuamente a las cambiantes necesidades del entorno económico corre a cargo de organismos como el *Bundesinstitut für Berufsbildung* (BIBB), en Alemania, el *National Council of Vocational Qualifications* (NCVQ), en Inglaterra, y las *Commissions Professionnelles Consultatives* (CPC), en Francia. Todos ellos, y sus homólogos en otros países, buscan el acuerdo entre la administración pública y los agentes sociales, pero su estatuto y su autoridad varían considerablemente.

Calidad y eficacia

La gran obsesión con que se abre la década de los noventa es, sin duda alguna, la calidad y la eficacia de la acción educativa y, por ende, el énfasis en su evaluación. Un reciente informe oficial sobre la situación de la educación en Estados Unidos tiene un título tan dramático como *Una nación en peligro* y frases suyas del mismo tenor se reproducen en otro

que la Academia Europea acaba de publicar sobre *La escuela en la moderna sociedad europea*.

Hay dos fuentes, en apariencia objetivas, para esta preocupación. Una es la comparación del nivel de exigencia escolar actual con el recuerdo que las generaciones adultas guardan del de su época. Dos prestigiosos sociólogos franceses, Christian Baudelot y Roger Establet, consideran que la pretendida decadencia de nuestras escuelas es una vieja idea y la han contrastado con los datos empíricos en lo que respecta a Francia. Según ellos, el resultado es que el nivel educativo ha subido con el paso del tiempo, pero no para todos ni por igual. Se da una profunda separación entre un grupo de cabeza (mucho más numeroso que algunas generaciones atrás) y la masa de los restantes. Dicho de otro modo, las elites académicas tienen hoy un nivel de conocimientos bastante más alto, pero no puede decirse lo mismo del resto. La pregunta es: ¿debe el sistema educativo concentrarse en la preparación de las elites o más bien redoblar sus esfuerzos por aumentar la educación de la mayoría?

La segunda fuente, no menos importante, son las comparaciones internacionales de los niveles académicos de estudiantes del mismo grupo de edad. Los datos aportados recientemente por la Asociación Internacional para el Estudio del Rendimiento Académico (un organismo independiente que realiza desde hace tiempo este tipo de investigaciones sobre los conocimientos de matemáticas y de ciencias) muestran, en efecto, una gran distancia entre, por ejemplo, los estudiantes de enseñanza primaria y secundaria de Japón y de Corea, de una parte, y los de Inglaterra e Italia, de otra. Alrededor del 40 por ciento de las escuelas primarias italianas y más del 60 por ciento de las inglesas obtuvieron cualificaciones más bajas que las de la escuela japonesa, con peores notas en ciencias.

Sin embargo, prácticamente la misma diferencia existía ya en 1970/71, cuando se realizó el primer informe. Y en ningún país europeo se ha observado el fenómeno de la disminución de las notas medias en casi un 5 por ciento durante el mismo período, como ha acontecido en los Estados Unidos.

Es natural que esta preocupación, unida al resto de los factores económicos y sociales que hemos considerado, den como resultado la modificación de los mecanismos de supervisión y control del sistema educativo, tradicionalmente confiada a los servicios administrativos de inspección, que se ven reforzados con otros organismos y nuevos usos. En términos generales, las legislaciones establecen los métodos de evaluación de los sistemas de enseñanza, ya sea de los resultados globales (caso de Francia, Inglaterra y Suecia, por ejemplo) o de cada nivel concreto (España y los Países Bajos), y obligan, por la presión de los Parlamentos y de la opinión pública, a que se elaboren y den a conocer regularmente informes de situación sobre su estado.

Curiosamente, una de las consecuencias de estas actuaciones suele ser de signo contrario al modelo de gestión del sistema educativo imperante. Allí donde existe una tradición de gestión centralizada, las instituciones educativas y las autoridades locales y regionales tienen cada vez mayor responsabilidad en el terreno de la evaluación; así, en Francia, ya no les corresponde a los inspectores centrales el papel principal en la evaluación de los profesores de secundaria. Por el contrario, en países donde se emprenden procesos de descentralización en profundidad, como España, o donde ya eran tradicionales las estructuras descentralizadas, como los anglosajones, los procedimientos de evaluación del sistema educativo confieren un nuevo poder directivo al Estado, que se erige en el único conocedor a fondo de su marcha y evolución, pues las autoridades locales y regionales no suelen disponer de la infraestructura necesaria para acometer funciones parejas a las del *Instituto de Evaluación* español o el *Schools Examination and Assessment Council* británico.

Las tendencias hacia la descentralización y la participación, con el consiguiente reparto de poder en materia educativa, se traducen inevitablemente en cambios en la gestión de los centros y, en cierta medida, en las tareas que desarrolla el profesorado, mayores en número y para algunas de las cuales no cuenta con la debida preparación (organización del trabajo de los alumnos, reparto y gestión de los recursos escolares, rendición de cuentas a las autoridades locales y estatales). No ha de sorprender, pues, que a lo largo de la década de los ochenta los docentes hayan hecho saber a la sociedad su creciente insatisfacción tanto con sus remuneraciones como con sus condiciones de trabajo, a veces con huelgas salvajes como las vividas en Grecia, Italia, España, Irlanda y el Reino Unido. En sentido opuesto, la descentralización acrecienta su conciencia profesional y el hecho de que participen en las decisiones disminuye la impresión de impotencia y de aislamiento que suelen experimentar como empleados de una pesada maquinaria administrativa, según indica un reciente informe de la OCDE.

En resumen, la educación europea tendrá que esforzarse en el futuro por conjugar su proverbial énfasis en las tradiciones culturales con las nuevas exigencias técnicas, políticas y económicas de las sociedades de Europa. A pesar del talante calculador y tecnocrático del proceso, cabe esperar que los valores personales y sociales prevalezcan en el diseño de la etapa obligatoria, quedando las discusiones sobre aspectos estratégicos, económicos o políticos para los niveles postobligatorios.

FRANCESC PEDRO se licenció en filosofía y letras (sección de ciencias de la educación) por la Universidad Autónoma de Barcelona (Bellaterra), recibiendo su doctorado por la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), de Madrid, donde actualmente es profesor titular de educación comparada. Amplió sus estudios en el Instituto de la Educación de la Universidad de Londres y en diversos organismos de la UNESCO.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SCIENCE ACHIEVEMENT IN SEVENTEEN COUNTRIES. A PRELIMINARY REPORT, *International Association for the Evaluation of Educational Achievement* (IEA), Pergamon Press, Oxford, 1988.

EDUCATION AND EUROPEAN COMPETENCE, *The European Round Table of Industrialists*, ERT, Bruselas, 1989.

LA EDUCACION EN EUROPA: REFORMAS Y PERSPECTIVAS DE FUTURO, J. L. García Garrido, F. Pedró y A. Velloso, Cincel, Madrid, 1989.

EDUCATION AND THE ECONOMY IN A CHANGING SOCIETY, *Organisation for Economic Cooperation and Development*, OECD, París, 1989.

CURRICULUM REFORM. AN OVERVIEW OF TRENDS, M. Skilbeck, OECD, París, 1990.

STRUCTURES OF THE EDUCATION AND INITIAL TRAINING SYSTEMS IN THE MEMBER STATES OF THE EUROPEAN COMMUNITY, Eurydice/Cedefop, Eurydice, Bruselas, 1991.

SCHOOLING IN MODERN EUROPEAN SOCIETY. A REPORT OF THE ACADEMIA EUROPEA, T. Husén, A. Tuijnman y W. D. Halls, Pergamon Press, Oxford, 1992.

Electrodomésticos

Compresor acústico en la nevera

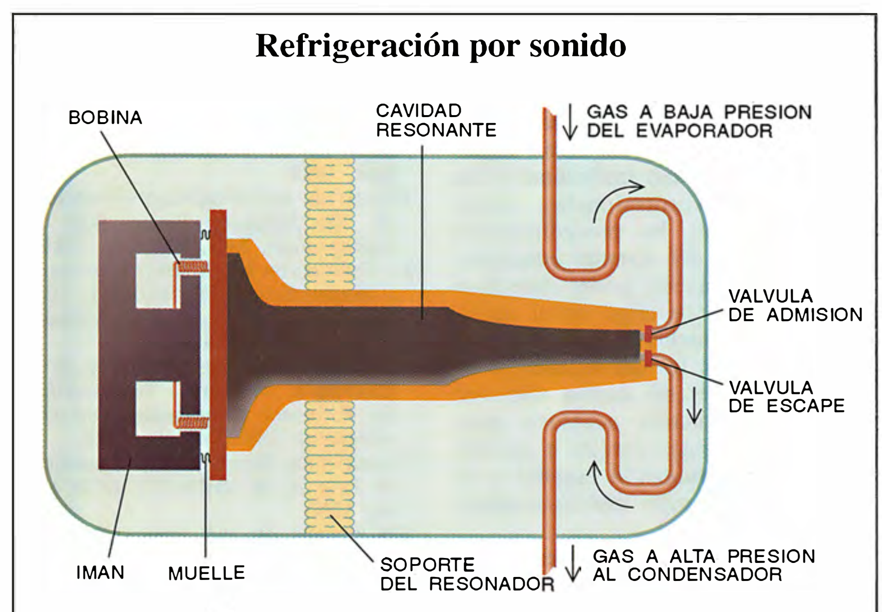
Tras años de refrigeradores cada vez más silenciosos, los fabricantes de electrodomésticos podrían tener que recurrir al sonido para enfriar la próxima generación de neveras. Un físico convertido en empresario ha desarrollado un compresor sónico sin lubricación que promete mayor rendimiento energético que los habituales; se sirve, además, de fluidos refrigerantes sin halocarburos (CFC), lesivos para la capa de ozono.

Timothy S. Lucas, presidente de Sonic Compressor Systems, ve en su ingenio el tónico que necesita la industria de electrodomésticos para cumplir la normativa, exigente con respecto a los CFC y al ahorro energético, que entrará muy pronto en vigor en varios países. Esa joven compañía ha construido prototipos y está negociando contratos con los fabricantes del sector. El compresor podría estar instalado en los nuevos refrigeradores en 1993.

Aduce en su ventaja que se trata de un sustituto de los compresores clásicos que no requiere modificaciones, reequipamiento ni otras onerosas innovaciones. Además, prosigue Lucas, "los produciremos a un precio equiparable". Esto, unido a una mejora prevista del rendimiento energético del 30 al 40 por ciento sobre los compresores actuales, permitirá que el fabricante ahorre en técnicas más caras de mejora de rendimiento: aislamiento más hermético, mayores intercambiadores de calor y ventiladores más potentes.

Los compresores clásicos suelen fundarse en pistones o rotores para comprimir el gas refrigerante. Como se parte de una vida media de la nevera de 15 o 20 años, hay que lubricar los compresores para evitar un desgaste excesivo. Líquido refrigerante y lubricante deben ser compatibles. Hasta ahora, la mejor mezcla constaba de aceites minerales y CFC 12, que dejará de emplearse pronto, quizás antes de 1996. La industria química defiende su sustitución por hidroflúorcarburo (HFC) 134a, un sucedáneo inocuo para la capa de ozono y de mínima incidencia en el efecto de invernadero.

A algunos expertos en refrigeración les preocupa que los lubricantes compatibles con el nuevo refrigerante no se desarrollen a tiempo. La industria de electrodométicos ha venido ensayando con aceites basados en ésteres, pero sin resultados satisfactorios. No alcanzan, por lo que parece, las propiedades lubricantes de los aceites minerales. Además, ocurren cosas raras cuando se añade otros compuestos para mejorar la efectividad de los lubricantes; andando el tiempo, los aceites de ésteres reaccionan con el HFC 134a y otros aceites usados para fabricar componentes, formando un residuo pegajoso que obtura los tubos del refrigerador. Los aceites, si reaccionan con el agua, corroen el interior, por lo que habría que fabricar neveras en un ambiente libre de humedad.



El compresor sónico se excita como un altavoz. La oscilación crea en la cavidad resonante una onda estacionaria de gran amplitud, que comprime el gas refrigerante. Una válvula de un solo sentido descarga el gas a un condensador, que lo licúa y enfría. El líquido circula alrededor del espacio a enfriar, evaporándose y por tanto absorbiendo calor; a continuación, el gas pasa al compresor para repetir el ciclo.

Frente a ello, el compresor de Lucas no necesita lubricación. De un plumazo, pues, se descartan las condiciones que imponen los aceites sobre la exigencia de un fluido refrigerante inocuo para el entorno. El compresor sónico no es más que un tubo (de morfología rara, eso sí) que actúa de cavidad resonante. Todo el resonador se mueve hacia adelante y hacia atrás unos 50 micrometros a lo largo de su eje cilíndrico a unos 340 hertz. La oscilación crea una onda estacionaria en la cavidad. Dada la determinada proyección de ésta, la onda estacionaria se refuerza a sí misma y las variaciones de presión que se logran en el tubo son grandes. En términos de presión sonora, la amplitud es de unos 200 decibelios, pero el compresor parece mudo porque la masa del tubo impide que se escape el sonido. Una válvula permite la salida del refrigerante a presión hacia el sistema de tubos que hace circular el fluido.

Lucas hubo de vencer un problema serio: eliminar las ondas de choque que se generaban en la cavidad, desperdiciando energía en forma de calor y limitando con ello la compresión. Dedicó un año entero a la solución, que buscó en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, con Gregory W. Swift, experto en acústica y máquinas cíclicas. "El truco estribaba en la configuración del resonador", explica. La forma hizo que los armónicos de orden superior causantes de la onda de choque interfiriesen destructivamente entre sí, dejando sólo la frecuencia fundamental en la cavidad.

Para una industria de conocida

mentalidad conservadora ante cualquier innovación técnica, el compresor de marras podría parecer arriesgado. El sector no ha olvidado todavía el desastre de la General Electric (GE) con su compresor centrífugo en los años ochenta. Después de acelerar su producción, GE descubrió que era deficiente; la compañía gastó unos 450 millones de dólares en ajustar y devolver los productos. Pero no parece que las compañías anden sobradas de alternativas viables ante la dureza de la normativa que les viene encima.

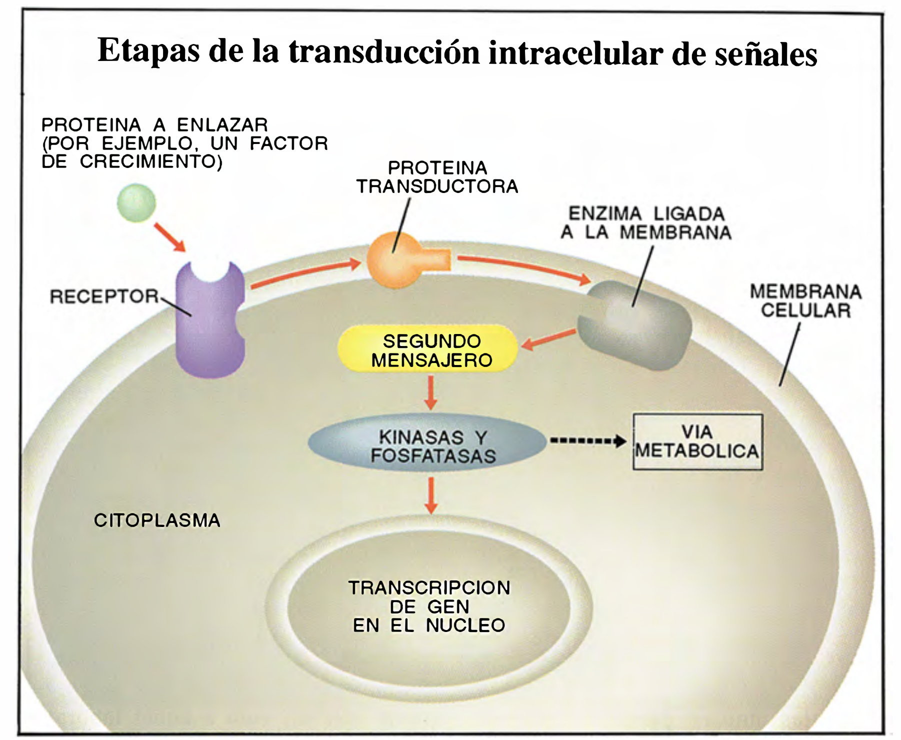
Comunicación celular

Objetivo de la nueva farmacología

Con el descubrimiento de que las células recibían instrucciones de las hormonas y de los factores de crecimiento llegó, en los años setenta, la era de la biotecnología. Pero fueron muy pocos los que consideraron la insulina y la eritropoyetina "primeros mensajeros." Bastaba con saber que tales proteínas promovían el cambio celular uniéndose a los receptores de la membrana que envuelve las células, y que su producción en gran cantidad permitiría tratar la diabetes y la anemia.

El elemento común que une hoy a varias empresas biotecnológicas es el curso que sigue la comunicación en el interior celular, una vez establecido el contacto con un receptor de la superficie. Cuando un receptor queda trabado, se altera su configuración. Esta acción convoca a segundos mensajeros, quienes, a su vez, avisan a otros portadores químicos del interior de la célula. Transducción de la señal, así se llama el proceso, que está abriendo nuevos caminos para la terapia del asma, alergias, artritis, cáncer, enfermedades cardiovasculares, psoriasis y otros trastornos. En román paladino: muchas enfermedades obedecen a disfunciones en las vías de transducción de señales.

Las compañías Ariad, Cadus, Onyx, Sphinx y Sugen, por enumerar una muestra, trabajan en la síntesis de moléculas que bloqueen o imiten la acción de los segundos mensajeros y su cohorte. Se acepta en el sector que la transducción de señales ofrece numerosos puntos para la intervención farmacéutica, aun cuando las vías no acaben de hallarse acotadas. En un símil ferroviario, diríase que buscan identificar una red viaria con sus cambios de agujas de complicación increíble disponiendo sólo de



FUENTE: *Ariad Pharmaceuticals*

meros atisbos experimentales de algunas de sus partes.

El enfoque de Sphinx gira alrededor de los lípidos de las membranas celulares. Las grasas regulan mensajeros secundarios clave, tales como la proteína kinasa C (PKC), enzima que participa en la inflamación y la proliferación. Cuando un factor de crecimiento se ancla en un receptor de la superficie celular, queda químicamente partida en dos la molécula de lípido alojada en la membrana. Se suelta un fragmento, que activa la enzima PKC en el interior de la célula y aviva una cascada de división celular e inflamación. Los investigadores de Sphinx creen que el taponamiento de esa señal que activa la PKC podría beneficiar a muchos tipos de pacientes, como los millones que sufren psoriasis.

Ariad Pharmaceuticals trabaja con fármacos para el tratamiento de alergias y asma. Por afectar a pacientes que experimentan ataques agudos, la eficacia del fármaco se comprueba en quince minutos. (Más tiempo, y mayor número de pruebas, requiere el ensayo de las drogas contra el cáncer.) La primera fase que Ariad se ha propuesto cubrir es la interacción que da por resultado la liberación de histamina, fenómeno bien conocido por los pacientes de alergias y asma. Cuando el polen u otro alérgeno penetra en el organismo, el sistema inmune emite un anticuerpo que le salga al encuentro. El complejo se ancla después en un receptor que está esperando en la superficie de un mastocito. Con la trabazón se ha modificado la configuración intracelular del receptor, suceso que provoca que la célula libere su provisión de histamina. El fenómeno bioquímico se ha comparado a la acción de un rayo que cae sobre un árbol y altera las raíces.

Sin duda, contaríamos con un fármaco eficaz contra la alergia si con él se evitase que las raíces alteradas del mastocito receptor entrasen en contacto con los componentes intracelulares que provocan la liberación de histamina. En ese empeño anda Ariad.

Otros investigadores han centrado su interés en la transferencia de los mensajes mediante la cesión de grupos de moléculas eléctricamente cargadas de una proteína a otra. Los segundos mensajeros avivan esas transferencias, de las que se ocupan determinadas enzimas. Citemos, a modo de botón de muestra, las kinasas, que añaden grupos de fosfatos negativamente cargados; las fosfatasas invierten esa acción.

En distintas formas de cáncer, y posiblemente en la diabetes no dependiente de insulina, la culpa parece corresponder a la enzima tirosina kinasa. Se la ha comparado con el pedal acelerador de las funciones específicas de crecimiento de la célula y absorción de glucosa. La situación de idoneidad en que debe hallarse la enzima para transferir grupos fosfato resulta decisiva para la difusión co-

rrecta de los mensajes de crecimiento a través de las células.

En Sugen, interesan los tejidos enfermos donde pueda apreciarse la inexistencia de receptores o su diferencia, si existen, de los receptores de tejidos sanos. Se sospecha que en tales receptores estaría una de las claves de las patologías. Si los receptores contienen kinasas, Sugen busca fosfatasas que encajen u otros medios de detener el proceso.

Con un planteamiento metodológico similar, Cadus, busca cortar la transferencia de grupos moleculares que alteren los receptores acoplados a las proteínas G. Los receptores de luz actúan sobre las proteínas G, explica Samuel D. Waksal, ejecutivo de la compañía: "En el ojo, un fotón, o cuanto de luz, activa un receptor. Entonces las proteínas G que se enlazan provocan una cascada de mensajes que se amplifican hasta que vemos la luz." La inflamación, la alergia y muchas otras respuestas a moléculas únicas pueden funcionar de la misma manera. Cuando una señal no se detiene, aparecen las enfermedades crónicas. El interés particular de la empresa se ha polarizado en el bloqueo de metilación y prenilación, en virtud de cuyos procesos las proteínas G se acoplan a los receptores.

Hay muchas proteínas reguladoras que, a modo de vallas, se interponen en el camino de la membrana celular al núcleo. En ese entorno opera Onyx, empresa dedicada a idear fármacos anticancerosos basados en la transducción de señales. Optan por la vía del *ras*, que abarca la tirosina y otras kinasas. Ciertas mutaciones en el gen *ras* (relacionado con el crecimiento de las células normales) lo confinan en permanente estado activo —el de muchos cánceres—; las vías de transducción de señales se tornan así hiperactivas. Es probable que los fármacos anti-*ras* frenen el crecimiento de los tumores, aunque no se sabe por cuánto tiempo; quizá las células mueran o permanezcan latentes mientras haya fármaco.

El cerrar vías usadas por las células normales crea preocupación acerca de los potenciales efectos perjudiciales que tales fármacos podrían producir sobre los tejidos sanos. Pero los experimentos en ratones con cánceres provocados señalan que la eliminación de los genes responsables de las vías destructivas no los perjudica. Todos estos resultados, tan prometedores, de la investigación sobre transducción de señales estimula seguir avanzando en un camino en el que pocos creyeron.

Empresarios científicos

Testimonio personal

Hace veinte años, trabajaba, como físico, en experimentos de difusión de neutrones en el Laboratorio Nacional de Brookhaven. Hoy ocupo la vicepresidencia de Sony USA y la presidencia de Sony Software.

He comprobado en mi propio quehacer que la formación en ciencia pura constituye una preparación ideal para los negocios. Diré más. En Estados Unidos irían bastante mejor las empresas si hubiera un número mayor de científicos, y un correspondiente número menor de economistas, en los puestos directivos.

¿Por qué creo que el detector de neutrones me preparó para la vida en Sony? En el desempeño de mi profesión desarrollaba un trabajo reputado de interés y lo hacía en compañía de personas a las que admiraba. Pero llegó un momento en que pensé si quería atar mi vida a aquel laboratorio otros veinte años más. Quizá valiera la pena intentar suerte en el mundo de la empresa, aunque no las tenía todas conmigo. Le confesé mis dudas a Robert Nathans, director de mi tesis doctoral, quien me dio un consejo que no olvidaré nunca: "No se atormente, Mickey. Usted es físico.Y los físicos no hacen nada que de verdad no quieren hacer. Si va usted a la empresa y se siente a disgusto, volverá al laboratorio."

Evidentemente, me gustó. Y sigo. Pero me quedé como físico. No importa la calificación laboral que se indique en mi hoja de salario. Me siento científico y he abordado siempre los problemas empresariales con el mismo talante con que me planteaba los experimentales. Las lecciones que aprendí fueron una instrucción excelente para los negocios.

Entre esas lecciones básicas citaré el sentido ético del trabajo. Los yuppies de los ochenta salieron de las escuelas de estudios empresariales con la idea de dedicar largas horas a su cometido. Pero esa tendencia estaba ya de moda en los laboratorios mucho antes de que nadie hubiera oído hablar de Michael Milken. Recuerdo muy bien oír las tres de la madrugada mientras vigilaba nuestro precioso reactor de haz de alto flujo durante un experimento. Las horas no importaban.

La ciencia estimuló mi curiosidad intelectual, la que ya poseía cuando resolví estudiar físicas. Pero el trabajar en el laboratorio en Brookhaven me enseñó cuán estimulante era convertir la curiosidad intelectual en el centro de la profesión. Han cambiado mis responsabilidades, pero la curiosidad intelectual permanece viva y forma parte principal de los motivos que me inducen a continuar en el mundo de los negocios.

No estaría sobrada la tenacidad, que es moneda corriente entre los dedicados al saber. Los ejecutivos empresariales se dejan llevar por la impaciencia. Los científicos con los que trabajé estaban también ansiosos por comprobar los resultados. Pero se daban cuenta de que uno tenía que construir los cimientos antes de poner el tejado. Me enseñaron el valor que encierra dominar los fundamentos de una especialidad antes de que uno pudiera hacer trabajo nuevo de interés. Cuando Sony compró Columbia Pictures, comencé a leer los guiones de las películas que teníamos en producción. Eso despertó el recelo de algún veterano. Uno se atrevió a preguntarme por qué quería los guiones. Poco le faltó para decirme que no iban a dejar que me hiciera cargo de las decisiones creativas. Pero me adelanté y le expuse que no pretendía dar lecciones a los expertos, sino conocer el proceso.

El mito del directivo intercambiable creó una generación de directores volantes en las empresas. La mayoría no tienen ni el tiempo ni la apetencia de aprender nada en profundidad acerca del negocio del que son responsables. Se limitan a aplicar las teorías de la facultad en cada uno de sus nuevos cargos. Con harta frecuencia no están en ninguno el tiempo suficiente para evaluar la veracidad de las teorías recibidas. Esta es una de las grandes diferencias entre los que tienen un título en estudios empresariales y los que lo tienen en ciencias. Los primeros aceptan las teorías como si del evangelio se tratara. Los de ciencias aceptan la teoría como el punto de partida para la experimentación.

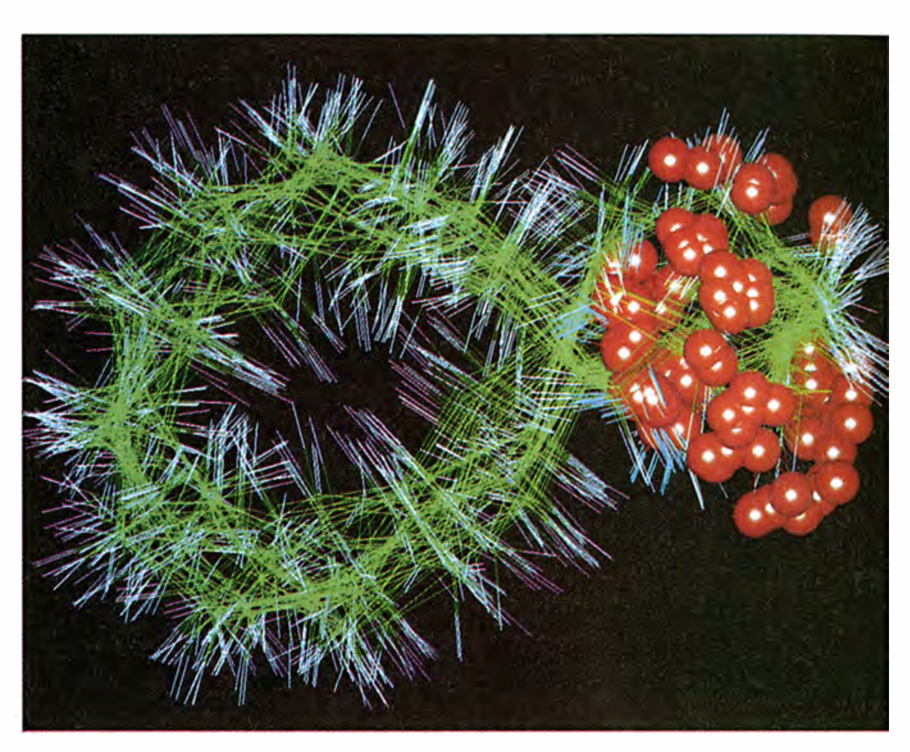
Una tendencia igualmente peligrosa en las escuelas superiores de administración de empresa es la que concierne a su potencial para restringir la creatividad. Cuanto mayor es la reputación de la escuela, tanto mayor el riesgo de que sus graduados confíen en la teoría de la dirección, sacrificando la creatividad personal. Hay ocasiones para hacer las cosas a la manera de Wharton o a la manera de Harvard. Pero también las hay para hacerlas a la manera de uno mismo.

Hay que tener visión de futuro. Y se necesita la confianza para invertir en tal visión. No sucede de otra forma en el ámbito de la ciencia: las personas a quienes más admiré gozaron de poder imaginativo para idear líneas de trabajo a largo plazo, po-

seían la energía para sostenerlas y no se avergozaban de cortarlas cuando la investigación demostraba que estaban equivocados.

En los próximos años, los empresarios se verán obligados a resolver problemas difíciles y preñados de riesgos, no sólo para su compañías, sino también para la sociedad en general. Habrá que decidir sobre nuevas tecnologías, medio ambiente, economía, mercado e incluso gobierno. Los científicos conocen el proceso del pensamiento crítico. Saben cómo analizar los problemas concentrándose en los elementos importantes y desechando los irrelevantes. Comprenden que los resultados valiosos requieren un esfuerzo creativo durante largo tiempo. Están dispuestos a admitir que hay cosas que no entienden y a emplear el tiempo necesario para averiguar qué es lo que no saben.

Los negocios necesitan ese talante y ese valor. Las empresas podrían mejorar en esa dirección reciclando a los economistas y licenciados en empresariales en facultades de ciencias. Sé que es improbable que se haga así. Entonces, no les queda a las empresas otra solución que contratar más científicos. (Michael Schulhof, vicepresidente de Sony USA y presidente de Sony Software.)



Las superficies moleculares, analizadas en detalle con inteligencia artificial, pueden mostrar que tienen configuraciones capaces de influir en el comportamiento de los fármacos. Foto: Arris Pharmaceuticals.

Inteligencia artificial

En la síntesis bioquímica

Si la primera no sale bien, pruebe otra vez. Si no, a la tercera. Cuantas veces haga falta. Esa es la tradición de tenacidad que ha caracterizado a la industria farmacéutica. El proceso, a veces intuitivo y casi siempre de tanteo, comporta el ensayo de 20.000 o 40.000 compuestos hasta encontrar una línea prometedora. De cada 4000 líneas prometedoras de éstas que se examinan, sólo uno se convierte en fármaco apto. Para domeñar y poner fin a esa barahúnda de ensayos, los químicos se han dedicado a lo largo de los diez últimos años a la síntesis de drogas que encajen en objetivos precisos, tales como los receptores de la superficie celular.

La creación racional de fármacos, apoyada en el ordenador, no ha dado de momento el resultado esperado. Los métodos se mueven en torno a la imagen de una molécula que presenta, se supone, la configuración ideal: por ejemplo, en el momento de enlazarse. Ahora bien, no abundan los programas de creación informática que tomen en cuenta los respectivos cambios de forma de una molécula y su receptor; por ello, los creadores de fármacos pueden equivocarse creando un compuesto "perfecto" incapaz de funcionar en el organismo.

Pero los sistemas de inteligencia artificial (IA) trazan un camino mejor en el aprovechamiento de la potencia de los ordenadores para el descubrimiento de fármacos. Se pueden escribir algoritmos de cálculo, similares a los que orientan a los misiles crucero en la detección de sus blancos, para reconocer las formas de las moléculas. Asimismo, ciertos programas desarrollados por expertos en robótica para mover un brazo mecánico sin tirar al suelo las piezas interpuestas, permiten al ordenador imaginar el enlace del fármaco a su receptor. Más que desarrollar sistemas expertos para sustituir a los químicos farmacéuticos se están creando herramientas que refuercen su intuición.

Arris Pharmaceuticals emplea sistemas de IA para optimizar la síntesis de fármacos contra el asma y para crear una forma oralmente activa de eritropoyetina, estimuladora de los glóbulos rojos. Gracias al ordenador se trabajará tan sólo con un 10 por ciento de las moléculas de ensayo habituales.

En el proceso, los investigadores programan las moléculas y los resultados de su comportamiento en los ensayos biológicos. El ordenador analiza los datos al objeto de determinar qué es lo que poseen en común todos los compuestos que dan buen resultado y en qué difieren de los inviables. Los expertos aplican luego las observaciones del ordenador en su siguiente ronda de experimentos, edificando poco a poco una base de datos de experiencia. Los algoritmos de aprendizaje de máquinas descubrirán los rasgos comunes que existen en todos los datos.

Al fiar en los ordenadores para seguir la pista a los experimentos, Arris espera poder modelar moléculas con una precisión superior a la habitual. La mayoría de las representaciones de fármacos hechas por ordenador se basan en unos pocos puntos y en las distancias y ángulos entre ellos. Se ha comprobado que se necesitan un centenar de puntos, al menos, para caracterizar adecuadamente una molécula. Atributos tales como la carga molecular y la hidrofobicidad añaden una dimensionalidad cuya consideración es difícil para los seres humanos, pero sencilla para los ordenadores.

En Arris se espera que la cartografía pormenorizada de la superficie de las moléculas depurará los prejuicios que se tienen sobre ciertas influencias estructurales en la conducta de las moléculas. Pero no sólo eso. También se saca partido de los fracasos y de los datos negativos. Y se confía en generalizar de los péptidos a pequeños fármacos orgánicos que se pueden tomar por vía oral.

Juegos de ordenador

Robin Jones

Técnicas de programación de juegos y un programa para jugar al dominó

Los programas de juegos de tablero, juegos en los que se enfrentan humano y ordenador, se cuentan entre las más antiguas aplicaciones no numéricas de la computadora digital. Tal vez no se deba a un mero azar que los desarrollos de la teoría matemática de juegos y del ordenador digital hayan sido coetáneos. Ya desde sus comienzos, esta ciencia informática ha apasionado a los matemáticos y a los amantes de los juegos, quienes por primera vez se hallaban ante una actividad "inteligente" en la que los conocimientos requeridos por el ordenador (a saber, las reglas del juego) se reducían a unas cuantas páginas, cuando no a unas pocas líneas de texto.

Los programas de juegos han evolucionado a lo largo de los cuatro últimos decenios desde el chaquete (o backgammon) y las damas hacia el juego de go y el ajedrez. El nivel de los primeros programas ajedrecísticos era, por lo general, bastante bajo; pero los actuales pueden crearle problemas serios a casi todos los jugadores. Hasta los programas de ajedrez de venta comercial me zurran con una facilidad que me desconcierta y desanima. Lo chocante de la evolución de tal tipo de programas es que verdaderamente se trata más de una evolución que de una revolución. Las ideas en que se fundaron los primeros algoritmos siguen en vigor y son de uso corriente; las modificaciones han afectado más al ambiente periférico de los programas que a su núcleo propiamente dicho.

Ya en el decenio de 1970 se vio claramente que los programas ajedrecísticos propendían a desarrollar los finales de partida sin objetivos claros y parecían experimentar dificultades para alcanzar la victoria desde posiciones que hubieran hecho las delicias de un jugador humano (quien, a diferencia del impasible ordenador, desea ganar). Para eliminar esta flaqueza, algunos programadores recurrieron a otros algoritmos, con el fin de obligar a la máquina a elegir, en los finales de partida, entre un número limitado de estrategias, en lugar de consentirle utilizar toda la gama de recursos disponibles en otras fases del juego. Detengámonos a examinar con detalle el algoritmo fundamental de un juego. Tomaremos para ello un juego muy simple, lo que permitirá captar los mecanismos básicos sin que nuestra mirada se distraiga en una miríada de detalles. Se trata de una versión simplificada del juego de Nim. He aquí las reglas.

Tenemos, al empezar, cinco cerillas sobre la mesa.

Los dos jugadores van retirando, por turno, una o dos cerillas.

Quien haya de retirar la última, pierde.

La simplicidad del juego consiente su descripción completa; esto es, cabe enumerar todos los casos que puedan darse. La figura 1 expone mediante un grafo arbóreo la totalidad de estas combinaciones. El guarismo de la derecha de cada nodo indica el número de cerillas que todavía quedan en esta fase del juego; cada posibilidad está designada por una letra (a la izquierda). Así pues, después de actuar el jugador *A*, el jugador *B* tiene ante sí, bien cuatro cerillas (caso *b*), bien tres (caso *c*). En el primer caso, a la jugada siguiente el jugador *A* se encontrará con tres fósforos (caso *d*) o con dos (caso *e*).

Fijémonos en que no hemos introducido en esta descripción estrategia alguna; nos hemos limitado a la enumeración de todas las jugadas posibles, a pesar incluso de que manifiestamente algunas de ellas conduzcan directamente a la derrota del jugador de turno. Procederemos ahora a asignar un valor a cada nodo terminal, según que el jugador gane o pierda. Por razones de simetría le atribuiremos al nodo el valor "1" cuando sea *A* quien gane, y el valor "–1" si lo es *B*. Asignaríamos el valor "0" a las situaciones en que se produzca el empate, pero en este juego de Nim no puede haber tablas. Asignaremos, pues, a los nudos designados por *u, q, r, s, h, t, m* y *n* los valores –1, 1, 1, 1, –1, 1, –1 y –1.

Examinemos ahora la porción de árbol que vemos en la figura 2. Es obvio que, a pesar de que el nodo designado por *l* (donde sólo queda una cerilla) no es terminal, su valor ha de ser igual a 1, porque la única continuación posible es el nodo *t*, cuyo valor es 1. Lo que estamos diciendo es, sencillamente, que si llegamos al nodo 1, el jugador *B* está obligado a tomar la última cerilla y pierde. Por otra parte, no es posible ir atribuyendo valores a los nodos situados hacia lo alto del árbol sin antes dotar de ciertas capacidades a nuestros jugadores.

Supongamos, pues, que ambos jueguen a la perfección, entendiendo por ello que ninguno de los oponentes retirará un número de cerillas que le sitúe en posición perdedora excepto cuando le resulte inevitable. En términos numéricos, estamos diciendo que el jugador *B* optará siempre, mientras le sea posible, por una posición de valor –1, y que el jugador *A* lo hará por las de valor 1. Afirmamos entonces que el nodo *f* tiene valor 1, pues *A* preferirá el nodo *l* al nodo *m*. Esta regla es conocida por "teorema minimax". En cada uno de sus turnos, *A* tratará de "maximizar" el valor del nodo alcanzado (elegirá 1), mientras que *B* tratará, por el contrario, de "minimizarlo" (optará por –1). Valiéndonos de esta regla podemos remontar el árbol con el fin de determinar el valor del nodo inicial, llamado "raíz". El valor correspondiente se denomina "valor del juego". Encontramos en nuestro caso que el valor del juego es 1, lo que significa que el jugador *A*, si opera debidamente, tiene asegurada la victoria.

El juego de Nim no ofrece demasiado interés, porque admite una descripción completa. En el caso del

ajedrez, por otra parte, la descripción completa crece a tal velocidad que un análisis como el anterior se torna enseguida inviable. En efecto, las blancas disponen de 20 posibles jugadas iniciales (dos desplazamientos para cada uno de los ocho peones, más dos desplazamientos para cada uno de los dos caballos). Exactamente lo mismo vale para las negras. Por tanto, se crearán 20 nodos correspondientes a cada uno de los movimientos iniciales de las blancas, y para cada uno de ellos habrá 20 nodos engendrados por las jugadas posibles para las negras, lo que hace un total de 420 nodos.

En las primeras fases del juego, al desplegar las piezas, hay cada vez menos restricciones para el movimiento de las piezas y el tamaño de una línea del árbol crece cada vez más rápidamente. El número de nodos disminuye al ir siendo tomadas piezas de uno y otro bando, pero aun así, el número total de nodos sigue siendo astronómico. Por esta razón resulta imposible la descripción completa y exhaustiva de juegos como el ajedrez. Señalemos, por otra parte, que si tal descripción fuese posible, el juego no tendría el más mínimo interés.

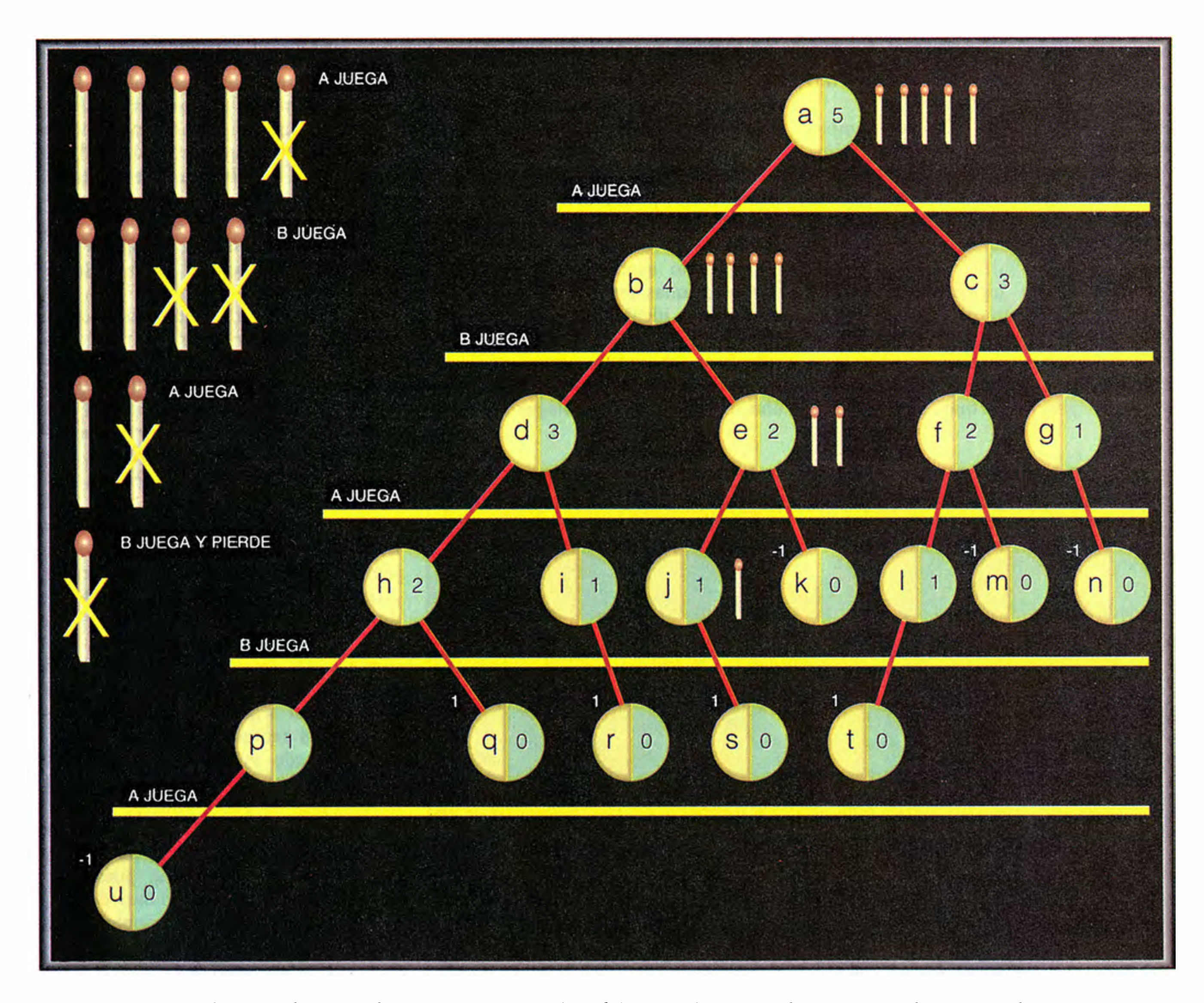
Una broma corriente en la comunidad de jugadores amantes de la electrónica: un programa ajedrecístico superpotente que, jugando con las negras, abandona tras dedicar 45 minutos de reflexión al movimiento de apertura de las blancas: ¡había calculado que el valor del juego era 1!

La solución práctica para analizar el juego de ajedrez consiste no en la exploración de todos los valores terminales, sino en la porción de árbol que se extiende hasta unos cuantos nodos más allá de la jugada a realizar. Tropezamos ahora con una nueva dificultad: al no disponer de los valores de los nodos terminales en los que hemos decidido interrumpir el análisis, valores que antes nos permitían ir remontando el árbol, ¿cómo podremos determinar el valor de los nudos que interesan?

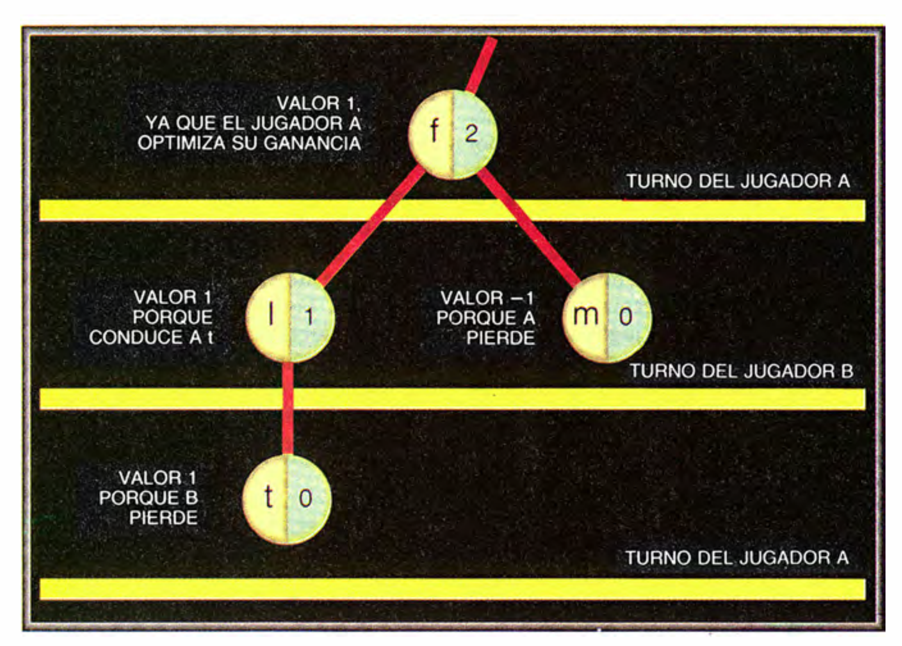
Encontramos la respuesta introduciendo técnicas de evaluación de cada posición dada del tablero. La calidad de esta descripción será determinante de la calidad de juego del programa. Podemos, por ejemplo, definir el valor de una posición de la partida haciéndolo depender tan sólo del material disponible sobre el escaqueado. Asignamos en consecuencia los siguientes valores a las piezas:

Peón = 1
Caballo = 3
Alfil = 4
Torre = 6
Reina = 10

Si el tablero contiene *pb* peones blancos, *pn* peones negros, *cb* caballos blancos, *cn* caballos negros, etc.,



1. El juego de Nim, descrito por un grafo arbóreo. A la izquierda, una partida ya jugada.



2. Evaluación por retrogradación del árbol de juego.

el valor del tablero se calcularía por la fórmula:

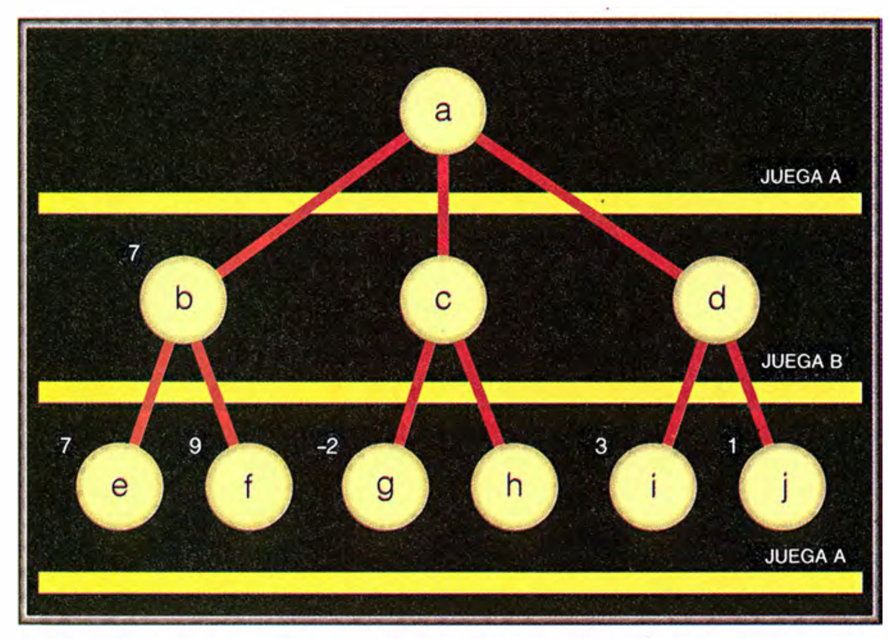
$(pb - pn) + 3(cb - cn) + 4(ab - an)$
$+ 6(tb - tn) + 10(rb - rn)$.

Tenemos en este caso un ejemplo de función de evaluación muy simple. Los coeficientes o pesos 1, 3, 4, 6, 10 de los valores de partida son más o menos arbitrarios, pues si bien es cierto que una reina es más valiosa que un alfil, ¿lo será precisamente en un factor de 2,5 veces más? Para saberlo, al menos en parte, podemos comparar los rendimientos de un programa que utilice una función de evaluación dada con los de otro programa que se valga de otra diferente, haciéndolos jugar enfrentados uno con otro. El programa perdedor deberá reajustar los valores de ponderación de su función de evaluación como paso previo al nuevo enfrentamiento con el programa vencedor. Sería de esperar que los valores de ponderación de uno y otro programa tendieran a converger al repetir el proceso. Es obvio que no por ello acabará ninguno de los dos programas tornándose en jugador de ajedrez ideal; este entrenamiento vendría a remedar el de un par de jugadores humanos que quisieran perfeccionarse jugando siempre el uno contra el otro: llegarían a un punto a partir del cual les resultaría imposible mejora alguna de no haber un tercer contendiente, una vez agotada la aportación de ideas nuevas al sistema.

Mas aún, suponiendo posible la creación de una función eficaz de evaluación, no por ello desaparecerán las dificultades debidas a la decisión arbitraria de no considerar sino las tres o cuatro próximas jugadas (o quizás alguna más). Supongamos, por ejemplo, que una de las jugadas posibles en la etapa más reciente comportase la pérdida de la reina del bando del ordenador. La función de evaluación asociada a tal jugada tomará un valor catastróficamente bajo; es seguro que tal opción no será tenida en cuenta. Por su parte, en cambio, un jugador humano sí sabe que los sacrificios de reina no son raros cuando desembocan rápidamente en jaque-mate. Tal conocimiento no es posible sino trascendiendo del "horizonte" de exploración prefijado, algo de lo cual es incapaz el ordenador, pues no ha sido programado para ello. Este ejemplo muestra por qué una máquina programada mediante una función de evaluación que atienda sólo a la relación de fuerzas de material demuestra tanta debilidad en los finales de partida. ¡Y es que la máquina ignora, pura y simplemente, que sería bueno dar jaque-mate al adversario!

Por otra parte, aunque la técnica consistente en no considerar sino un reducido número de futuras jugadas supone una enérgica podadura del árbol de exploración del juego, el número de nodos a examinar sigue todavía siendo muy importante. Lo cual exigirá demasiado tiempo, demasiada memoria o ambas cosas. Por esta razón se utiliza otra técnica, conocida por "podadura alfa-beta". Fijémonos en el árbol de la figura 3. Algunos nodos han sido evaluados ya.

Es el turno de *A*, quien desea maximizar su puntuación. El nodo *b* tiene un valor 7; si *A* lo elige, le tocará jugar a *B*. Este procurará minimizar su tanteo. Si *A* hubiera elegido el nodo *c*, *B* podría conseguir por lo menos –2, en cuyo caso salta a la vista la inutilidad de que *A* evalúe el caso *h*, por ser obvio que el valor –2 decide que *A* no juegue *c*. De igual manera, *d* no puede ser mayor que 3 (desde el punto de vista de *A*). Utilizamos 7 como valor límite, determinado por el valor óptimo de *A* cuando opta por *b*. Tal valor se denomina "límite alfa" en la jerga habitual. Si a resultas del



3. La podadura alfa-beta.

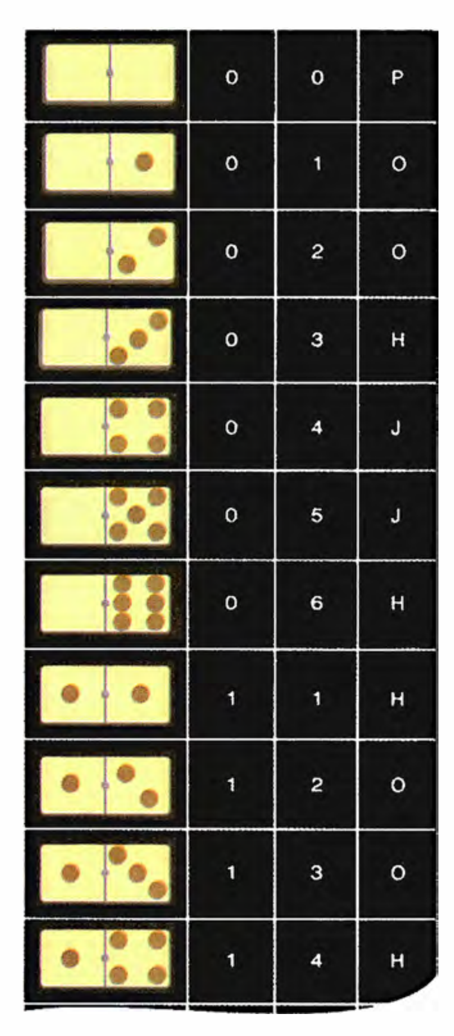
proceso de minimización se ve que existe un valor inferior a éste, no será necesario que *A* examine ninguno de los nodos hijos ni de los descendientes de éstos. Para el proceso de maximización bastará recorrer el camino inverso, es decir, que si encontramos un valor superior a un "límite beta" podremos interrumpir toda búsqueda ulterior.

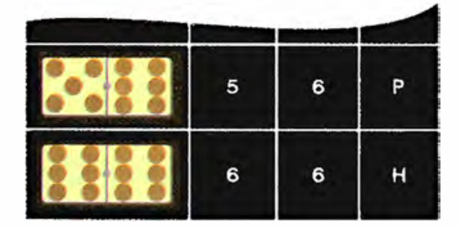
La aplicación de estas ideas al juego de ajedrez ha sido empresa de gran aliento. La definición de las jugadas lícitas, de los desplazamientos de las piezas, etc., son cuestiones cuya programación dista de ser fácil. Por tanto, en el resto del artículo nos ocuparemos solamente de la programación de un juego más sencillo, el dominó, juego que posee algunas características interesantes desde nuestro punto de vista. Y aun así, haremos un poco de trampa, al menos para empezar. La búsqueda del árbol de juego óptimo va a depender del conocimiento completo de los valores de cada una de las posibles jugadas del espacio de búsqueda. En el caso de una partida real de dominó, tal conocimiento es incompleto, pues no tenemos a la vista la mano del adversario. Haremos trampa y echaremos un vistazo por encima de su hombro para informarnos. ¡Como es el ordenador quien distribuye las piezas, que saque partido de lo que sabe!

Analizaremos una partida entre dos jugadores. Cada uno recibe siete piezas, y quedan otras 14 sobrantes en el revoltillo. El jugador humano abre, colocando sobre la mesa uno cualquiera de su dominós. El ordenador responde colocando una pieza que ligue con una de las mitades del primero. Cuando alguno de los jugadores no puede jugar, roba un dominó de los sobrantes. Gana la partida el jugador que coloque el último de sus dominós, o si el juego queda cerrado, quien acumule menor número de puntos.

Elegiremos como función de evaluación la diferencia entre la suma de puntos de la mano del ordenador y la suma de puntos del jugador humano. Esta función de evaluación opera bien; es positiva cuando el humano lleva las de ganar y negativa cuando es el ordenador quien lleva ventaja. La estrategia descrita es sabia y prudente, pero en forma alguna se debe entender que una función de evaluación tan primitiva sea perfecta. En efecto, para una tal función, los dominós [0–6], [3–3] y [2–4] son equivalentes.

Vemos en la figura 4 representadas en su totalidad las piezas de dominó





4. El juego completo de dominó. Los ceros representan blancos.

en una tabla bidimensional de longitud 28, en la cual hemos indicado además, en la columna de la derecha, en qué lugar se encuentra el dominó en cuestión: si ha sido jugado ya (*J*), si figura entre los del humano (*H*), entre los del ordenador (*O*), o si está en el revoltillo (*P*). La construcción de la tabla se hace de acuerdo con el algoritmo siguiente, en el cual la instrucción 3 se encarga de evitar que un mismo dominó sea colocado dos veces en la mesa. El número *p* sirve para numerar los dominós:

1. Poner *p* a 0
2. Poner *x* a 0
3. Hacer *y* igual a *x*
4. Mientras que *y* se conserve menor que 7, poner el vector *p* en [*xy*], incrementar *p* e *y*
5. Incrementar *x* : ir a 3.

La representación del juego en un instante dado puede ser entonces expresada a partir de los estados posibles para cada dominó. Un dominó puede estar:

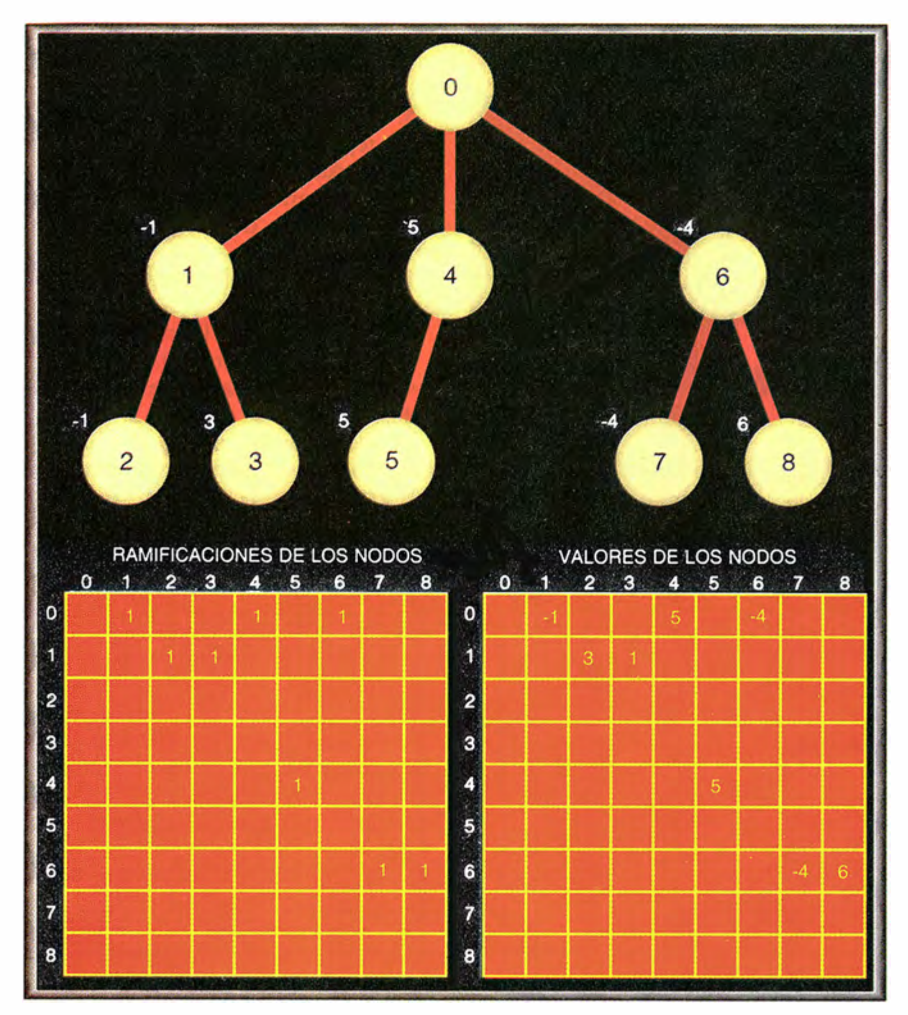
1. Entre los de la mano del jugador humano (*H*)
2. En la mano del ordenador (*O*)
3. En el revoltillo (*P*)
4. Sobre la mesa, entre los ya jugados (*J*)

El identificador *H*, *O*, *P* o *J* permite una descripción casi completa del estado de la partida; no falta más que otra parte de la información necesaria para la descripción completa: los valores terminales, o sea, los valores de las extremidades de la ristra de dominós jugados, valores que determinan las jugadas lícitas siguientes. Estos valores pueden ser colocados, o bien en una tabla de dos casillas, o ser incorporados a la tabla precedente. Los procedimientos que vienen a continuación determinan las condiciones iniciales de la partida:

1. Asignación de todos los dominós al revoltillo de partida.
2. Generación de siete números aleatorios distintos comprendidos entre 0 y 27. Estos números son utilizados como punteros en el tablero e inscriben una H en la columna correspondiente.
3. Generación de otros siete números aleatorios distintos entre sí y distintos de los anteriores, comprendidos entre 0 y 27, que se utilizarán como punteros sobre el tablero y que inscriben una O en los indicadores correspondientes.
4. Introducción en las casillas de "valores terminales" de los valores del dominó de la primera jugada.

Una jugada consiste en reemplazar los indicadores apropiados; así, *H* por *J*, *O* por *J*, *P* por *H*, etc., y en cambiar uno de los valores terminales cada vez que se juega un dominó; si en una fase del juego los valores terminales son 6 y 3 y se añade a la ristra de la mesa el dominó [3–4], el ordenador empareja los dos treses y reemplaza el valor terminal 3 por el valor 4. Se obtienen así los nuevos valores terminales 6 y 4.

Todavía queda por resolver el problema de la generación y exploración del árbol del juego. Si el lector tiene acceso a un lenguaje de tipo LISP, en el cual la estructura interna de los datos es esencialmente arborescente, el problema casi se resuel-



5. Representación de árbol mediante una tabla; función de evaluación correspondiente.

ve por sí solo. Por otra parte, si se pretende utilizar un lenguaje procedimental clásico será necesario expresar una estructura arbórea mediante una tabla. Una forma de proceder consiste en crear una tabla cuadrada en la cual los números de línea se corresponden con los números de los nodos; dada una línea (esto es, dado un nodo), se sitúa la cifra 1 en cada columna cuyo número corresponda al de un nodo sucesor directo del considerado. La figura 5 ilustra esta operación.

No obstante, está claro que la mera existencia o inexistencia de ramificaciones no proporciona información suficiente. Necesitamos conocer los valores de la función de evaluación en el nivel más bajo en que deba ser efectuada la exploración, y puesto que el juego ha debido desarrollarse antes para poder llegar a ese nivel, es preciso dejar registrados los estados del juego correspondientes a cada nodo. Podríamos abandonar el estado de juego en cada etapa y recalcularlo cuando fuese necesario, pero ello no resultaría útil salvo que estuviésemos escasos de memoria. Ahora bien, cada estado de juego puede ser descrito con menos de 90 octetos; por lo tanto, un árbol de juego de 5000 nodos puede quedar representado sin dificultad en 0,5 mega-octetos. El árbol que describe nuestro juego no se ramifica demasiado rápidamente, porque el número de jugadas lícitas de cada jugador es, en la práctica, muy reducido.

Así pues, empezaremos ante todo haciendo crecer el árbol en profundidad, insertando en la tabla enlaces entre los estados correspondientes del juego a medida que éste progresa; hecho, la técnica de selección y retrogradación hacia las evaluaciones terminales resulta sencilla. Para esta investigación, las líneas de la tabla que no contengan enlaces representan nodos terminales (de esta exploración); su valor se calcula con la función de evaluación.

En la tabla de la figura 5 podemos observar (línea 7) que el nodo 7 es terminal. La columna número 7 no está ocupada más que en la fila 6, lo que indica un enlace del nodo 7 con el nodo 6. Insertamos en la intersección de la fila 6 y la columna 7 el valor del nodo 7, que es –4, en sustitución del 1 que allí había. También el nodo 8 es terminal. Por igual procedimiento, situamos el número 6 en la columna 8. El valor del nodo 6 es, visiblemente, de –4, valor que trasladamos a la casilla intersección de la línea 0 y de la columna 6 (suponiendo que nos encontremos ya en el proceso de minimización). Se examinan los valores máximos y mínimos de una fila dada para calcular el valor del nodo situado por encima. Cuando hayamos alcanzado la raíz del árbol, el valor máximo (o mínimo) de la línea siguiente es el que determina la jugada óptima.

La redacción del programa de este juego es razonablemente sencilla. Una vez realizada, se le pueden aportar las mejoras siguientes:

1. Como ya hemos indicado, es posible mejorar la función de evaluación. Para empezar, no todas las cifras de una mano tienen la misma frecuencia. Puede suceder, por ejemplo, que en una mano tengamos tres cincos y ocho doses. Ello hace pensar que una buena estrategia consistiría en jugar lo antes posible el dos doble si es que lo tenemos, en parte para desembarazarnos de él y en parte porque es probable que así se limiten las posibilidades de elección de nuestro adversario. Como la evaluación del árbol podría tener en cuenta esta posibilidad, ¿por qué no incorporarla a la función de evaluación, lo que tendría por efecto minimizar el efecto de horizonte?

2. La versión del juego aquí descrita da por supuesto que cada jugador conoce perfectamente tanto su mano como la del adversario. Se podría revisar el programa de modo tal que la función de evaluación esté definida, no de acuerdo con la mano real del contrario, que no es conocida, sino de acuerdo con la mano probable, que se calcularía en función de la mano propia, del número de dominós que conserva el adversario y de las piezas ya jugadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNA MÁQUINA AJEDRECÍSTICA CON NIVEL DE GRAN MAESTRO. Feng-hsiung Hsu, Thomas Anantharaman, Murray Campbell y Andreas Nowatzyk. *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1990.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Asesinato en la Alquería Siniestra

En el 221B de Baker Street había caído la tarde. Holmes estaba interpretando en su violín un aire irlandés cuando me vi obligado a interrumpirle.

"Holmes, acabamos de recibir una carta que expone un asunto de la máxima urgencia."

"Tenga la bondad de leérmela, Watson."

"La dirección del remitente es Alquería Siniestra, en Aldeatétrica:

Estimado Sr. Holmes,

Se ha producido un terrible asesinato. La Srta. Margálida Nabiza ha sido golpeada con una lámpara hasta morir. La policía está desconcertada. Suplicámosle nos ayude cuanto antes a resolver este crimen horripilante.

Corneliano, Duque de Aldeatétrica."

"Watson, no hay instante que perder. Haga nuestro equipaje y llame a una manuela que nos porte a la estación. Tan singular delito habrá sin duda de reclamar el máximo de nuestros ingenios."

Llegados al cercano pueblo de Aldeatétrica, Holmes y yo pudimos ver la Alquería Siniestra. Aquel vetusto recinto acastillado comprendía 46 torrecillas dispuestas en tres círculos concéntricos en torno a un torreón central. Las torres hallábanse interconectadas por estrechos pasadizos situados todos a varios pisos de altura sobre el suelo. La única entrada visible se encontraba del otro lado de un puente levadizo conducente a la torre más occidental.

Fuimos recibidos en la poterna por el mayordomo, quien dio al presentarse el nombre de Oízo. Nos guió, haciéndonos subir por una escalera de caracol y después por un pasadizo conducente a una torre vecina, donde fuimos presentados al duque de Aldeatétrica.

"¡Sea bienvenido, Sr. Holmes!", exclamó el duque. "Las palabras no bastan para expresarle mi gratitud!"

"No se precisa gratitud."

"El asesinato se produjo en la habitación de la Srta. Nabiza. ¿Desea usted inspeccionarla?"

"Dentro de un momento, si su señoría me lo permite. Antes he de enviar un telegrama."

"Oízo se cuidará de hacerlo, Sr. Holmes. Esperaremos —no tardará mucho." El mayordomo regresó al poco.

"Señores, tengan la bondad de seguirme", dijo el duque. "Cada torre de la Alquería viene a ser una única estancia grande, estando cada una habitada por uno de los miembros sobrevivientes del linaje de Aldeatétrica." Entraron en la torre de la Nabiza.

"Aquí es donde fue cometida la acción horrenda", suspiró el duque. "Solía haber una gran lámpara de araña pendiente del centro del techo, pero el asesino logró hacer que se desprendiera cuando la pobre Margálida dormía directamente debajo."

"¿Quién descubrió el cadáver?", quise saber.

"Yo fui, señor", replicó el mayordomo. "Es decir, lo que quedaba de él."

"Así que fue usted la última persona que vio con vida a la Srta. Nabiza."

"Si exceptuamos al asesino, así es, señor."

Me percaté de que Holmes, que

POTERNA
DUQUE DE ALDEATETRICA
LADY GAMBOGE
CHOLMONDELEY CARMINE
SRTA. NABIZA
DUQUESA DE AMARANTE

1. La Alquería Siniestra es el escenario del crimen. La Srta. Nabiza ha sido asesinada en su aposento. Los números indican cuántos pasadizos rodean cada región.

había estado inspeccionando la sala con su lupa, se había detenido y prestaba oído atentamente. "Me temo que no vamos a encontrar aquí ninguna pista, Watson", dijo. "La policía ha perturbado la estancia demasiado concienzudamente." Echó una ojeada por la sala. "¿A quién pertenece la torre a la que conduce esa puerta?"

"Pertenece a la duquesa de Amarante."

"¿Puede haber sido ella la asesina?"

"Oízo tiene el único juego de llaves", respondió el duque. "Las llaves tienen un diseño extraordinariamente intrincado y tengo la convicción de que le sería imposible a nadie hacer duplicados. En cualquier caso, la duquesa es terriblemente sorda y se pasa el día durmiendo."

Holmes se dio por enterado con el gesto. "¿Estaba todo el mundo en sus habitaciones en la noche del crimen?"

"Podemos estar prácticamente seguros", volvió a suspirar el duque. "Por así ordenarlo mi abuelo en su testamento, todos mis familiares han de permanecer confinados en sus habitaciones durante la noche. El primer duque sentía pavor a la soledad, y por eso su testamento exige a cada uno de sus descendientes que pase la noche en la Alquería, so pena de renunciar, en caso contrario, a todo derecho sobre la fortuna familiar."

"Así es, señor", remachó Oízo. "Llegado el anochecer reviso por turno todas las torres y cierro con llave todas las puertas de comunicación. Por la mañana vuelvo a hacer la ronda y abro las puertas. Aquella espantosa mañana llamé a la puerta de la Srta. Nabiza. No hubo respuesta. Ello me preocupó y abrí la puerta. Fue entonces cuando vi... los restos."

"¿Y nadie entraba o salía de la Alquería durante la noche?"

"No, señor. Jamás, señor. La única forma de hacerlo sería pasar a través de torres vecinas hasta llegar a la torre de acceso, donde permanezco yo toda la noche. Puedo confirmar que nadie pasó por ella para entrar o salir."

"Y todos los moradores gozaban de buena salud cuando usted los cerró bajo llave."

"Así es, señor. Todos ellos tienen llamadores en sus torres, señor, y una vez que se encuentran cerrados con llave llaman con ellos al torreón del duque para confirmar que se encuentran presentes."

"Me valgo de los llamadores para comprobar que se atienen a los mandatos del testamento", añadió el duque. "Oízo tiene razón. Llevo un registro estricto: todas y cada una de las campanas fueron tocadas."

Holmes se volvió hacia Oízo.

"¿Entra usted en alguna torre más de una vez?"

"¡De ninguna manera, Sr. Holmes!", exclamó el criado. "Cuando hago mis rondas sólo entro una vez en la torre —ésa es regla inviolable. De ninguna manera podría permitirme molestar a nadie una vez que su torre ha sido cerrada."

Holmes intentó el interrogatorio en otra dirección.

"Señoría, ¿ha determinado la policía la hora aproximada del suceso?"

"Resultó imposible de averiguar, Sr. Holmes, por el estado del cadáver. Habida cuenta de la medida en que se congeló la sangre, pensaron que la muerte seguramente se produjo antes de la medianoche."

El ceño de Holmes se frunció y permaneció fruncido. "¿Habría alguna forma de que una persona pueda pasar entre las torres que no sea por los pasadizos elevados?"

"Es posible que un montañero experto pudiera escalar los muros desde el nivel del suelo. Ahora bien, Sr. Holmes, jamás podría hacerlo de noche. La familia Aldeatétrica siente gran preocupación por la seguridad. La última acción de Oízo en sus rondas nocturnas es dejar suelta una jauría de perros por los terrenos de la Alquería."

"¿Qué ruta sigue usted durante la ronda, Oízo?"

"Pues... depende, señor."

"¿Podría usted recordar qué ruta siguió la noche del asesinato?"

"No, señor."

"Es una verdadera lástima." Holmes meneó la cabeza pesaroso. "Watson, vamos a alquilar habitaciones en el pueblo para pasar la noche. Poco más podemos hacer aquí."

"Pero, señor Holmes, el asesinato..."

"Si su señoría me permite, yo no he dicho que no pueda resolver el crimen. Me estaba limitando a mencionar que mis pesquisas aquí ya han concluido. El Dr. Watson y yo tenemos algún trabajo por delante, mas no me cabe duda alguna de que dentro de poco podremos citar el nombre del criminal. Oízo, tenga la bondad de llamar un carruaje."

Holmes y yo nos retiramos a una cómoda posada de la villa Aldeatétrica. "Holmes, ¿le hablaba usted en serio al duque? ¿Tiene usted verdadera confianza en poder nombrar al asesino?"

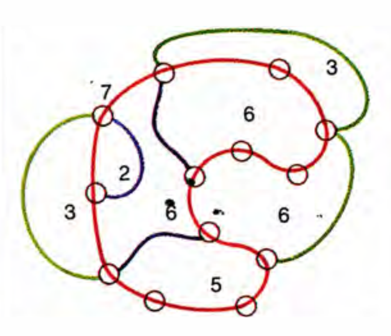
"¿Desde cuándo, Watson, he obrado con doblez ante un duque?"

"Pero... es que tenemos tan poco con que seguir..."

"¡Bobadas, Watson! Pasemos revista a los hechos relevantes. La Srta. Nabiza fue asesinada antes de la medianoche. No hubo intrusos que pudieran entrar o salir, debido a los perros. Por consiguiente, el asesino hubo de ser uno de los moradores de la Alquería. Oízo encerró a los residentes en sus habitaciones individuales y seguidamente éstos informaron al duque de que se hallaban presentes. Oízo partió de la torre de acceso y retornó a ella, pasando por cada torre exactamente una vez. Una vez cerradas las habitaciones, los únicos residentes que pudieron haber entrado en la morada de la Srta. Nabiza sin ser observados eran sus vecinos

Fórmula de Grinberg

La red que vemos consta de 13 nodos conectados por 19 sendas. Se denomina "circuito hamiltoniano" a cualquier recorrido cerrado (*rojo*) que visite a todos y cada uno de los nodos una y sólo una vez. Las sendas no pertenecientes al circuito se denominan "diagonales", que pueden ser interiores (*azul*) o exteriores (*verde*). Circuito y diagonales delimitan varias regiones, cada una de las cuales posee varias sendas ("lados") que la contornean.



Sea f_j el número de regiones de j lados situadas en el interior del circuito. En el ejemplo, $f_2 = 1$, $f_5 = 1$ y $f_6 = 2$. Análogamente, si g_j denota el número de regiones de j lados ubicadas en el exterior del circuito, vemos que $g_3 = 2$, $g_6 = 1$ y $g_7 = 1$. Dado que la red contiene un circuito hamiltoniano, tiene que satisfacer la fórmula de Grinberg, que en este caso es

$$(f_3 - g_3) + 2(f_4 - g_4) + 3(f_5 - g_5) + 4(f_6 - g_6) + 5(f_7 - g_7) = 0.$$

Al sustituir en el primer miembro los valores de f_j y de g_j, el resultado es

$$(0 - 2) + 2(0 - 0) + 3(1 - 0) + 4(2 - 1) + 5(0 - 1),$$

que es verdaderamente igual a 0.

inmediatos. Pero para ello hubieran precisado de llave y el único juego lo posee Oízo. No es posible copiar las llaves. ¿Quién ha podido, entonces, cometer el asesinato?"

"Euh... uh... ¡Claro! ¡Oízo! Sólo él pudo haber regresado a la habitación de la Srta. Nabiza después de que ésta hubiera hecho sonar la campanilla para informar que se hallaba presente."

"Exactamente. El duque nos dijo que la duquesa de Amarante, que ocupa la estancia adyacente, es sorda como una tapia y duerme profundamente. Oízo pudo haber esperado en la estancia de la duquesa hasta que la Srta. Nabiza hubiera hecho su señal y vuelto a entrar después para matarla."

"¿Con una lámpara de araña?"

"La asesinó con otra arma —un trozo de tubo, tal vez— y preparó después la caída de la lámpara para ocultar las pruebas."

"Una teoría interesante", dije.

Holmes asintió con la cabeza. "Pero hasta ahora no es más que una teoría, Watson. ¿Cómo podremos demostrar que Oízo fue el asesino? La duquesa de Amarante seguiría durmiendo cuando él volvió a salir para proseguir su ronda como si nada hubiera ocurrido."

"El ruido de la lámpara al caer seguramente tuvo que despertar a alguien..."

"Las torres están aisladas unas de otras. No, nadie pudo oír ruidos raros."

"Pero Oízo se retrasaría en su ronda."

"Apenas unos minutos si tuvo la precaución de debilitar anticipadamente la sujeción de la araña. No lo bastante para llamar la atención."

Me di una fuerte palmada en la frente. "¡Pues estamos vencidos, Holmes! ¡No ha podido ser ningún otro que Oízo, pero tenemos que dejar que el muy ladino salga de rositas!"

Holmes dejó escapar una risita. "De ninguna manera, Watson. Si la suerte nos acompaña, es muy posible que se vea condenado por sus mismas palabras." Me pasó una hoja de papel. Veíase en ella un mapa de la Alquería Siniestra. "He aquí, Watson, un sencillo rompecabezas para usted. Oízo declara que en su ronda nocturna pasa una y solamente una vez por cada torre. No pudo haberse desplazado de una torre a otra sino por los pasadizos. Tal vez me haga usted el servicio de buscar para mí una de tales rutas."

"Ciertamente, Holmes. Tiene que haber cientos de soluciones."

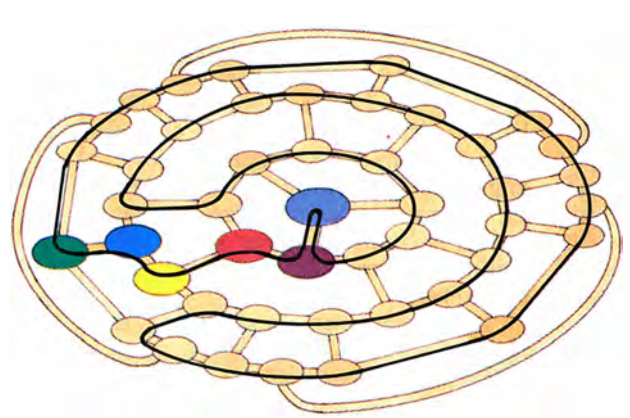
"En verdad, Watson, tengo la sospecha de que ni siquiera hay una. Le he pedido que halle usted un circuito hamiltoniano, vale decir, un bucle cerrado trazado sobre una red, que visite cada uno de los nodos de ésta exactamente una vez. Recibe su nombre en recuerdo de sir William Rowan Hamilton, quien puso a la venta un rompecabezas que pedía precisamente uno de tales circuitos que recorriese las aristas de un icosaedro. No se conoce un método general infalible, aparte de la exploración sistemática de todas las posibilidades, que permita saber de antemano si una red dada posee o no un circuito hamiltoniano."

"En tal caso, Oízo también ha conseguido burlar el lazo de la horca, pues la red es demasiado grande para analizarla por tanteo sistemático."

"No necesariamente, Watson, no necesariamente. Confío en que la suerte va a estar de nuestro lado. He podido leer hace poco los fascinantes trabajos de un matemático ruso que lleva el nombre de E. J. Grinberg, que ha ideado una condición que necesariamente ha de cumplir toda red planar que admita un circuito hamiltoniano. Veamos si las torres de la Alquería la verifican. Haga el favor de repasar mi trabajo, Watson."

"Haré lo más que pueda, Holmes."

"Imaginemos una red que se pueda dibujar en el plano, esto es de la máxima importancia, Watson. Aunque los pasadizos de la Alquería Siniestra estén elevados, no se cortan unos a otros. Supongamos que una tal red consta de n nodos y de cierto número de sendas que conectan tales nodos. Demos por supuesto que existe un circuito hamiltoniano que conecta los nodos..."



2. Oízo no puede visitar todas las torres de la Alquería sin volver sobre sus pasos. Es forzoso, como vemos, que visite al menos dos veces una de las torres.

"Dicho de otro modo", interrumpíle, "usted quiere decir que existe en la red un recorrido cerrado que pasa por cada nodo una y solamente una vez."

"Exactamente. En tal caso cabe deducir ciertas características de la red. Sabemos, ante todo, que el circuito hamiltoniano tendrá n lados, pues visita cada nodo exactamente una vez. Las conexiones no pertenecientes al circuito corren 'diagonalmente', bien a través del interior o del exterior de tal circuito. El interior está dividido en cierto número de regiones por aquellas diagonales que lo cruzan. Si el número de diagonales es d, el número de regiones tiene que ser $d + 1$."

"¿Y eso por qué, Holmes?"

"Imaginemos que las diagonales se van añadiendo una por una. El propio circuito hamiltoniano delimita una región y cada diagonal produce una diagonal adicional. Ahora bien, disponemos de otro método para contar el número de regiones. Cada región tiene cierto número de lados: las líneas de la red que la contornean. Para cada entero j, denotemos f_j al número de regiones que tienen j lados. El número total de regiones del interior estará dado también por $f_2 + f_3 +...+ f_n$. Y por consiguiente, $f_2 + f_3 +...+ f_n = d + 1$."

"Muchos de estos f_j serán iguales a cero. ¿Me equivoco?"

"No, en efecto, así es. A continuación voy a contar de dos modos diferentes el número de lados que contornean estas regiones. Cualquier región con j lados está limitada por j aristas, por lo que tales regiones aportan jf_j al total."

"Así pues, Holmes, el total sería $2f_2 + 3f_3 +....+ nf_n$."

"Bueno, no del todo. En tal recuento, cada una de las d diagonales ha sido contada dos veces, una por cada una de las regiones a las que llega, pero los n lados del circuito son contados sólo una vez. Por lo tanto, $2f_2 + 3f_3 +....+ nf_n = 2d + n$. Ahora, multiplicando por 2 ambos miembros de la primera ecuación y restando ésta a la segunda, resulta

$$f_3 + 2f_4 + 3f_5 +...+ (n - 2)f_n = n - 2.$$

Tenemos una ecuación parecida para el exterior del circuito,

$$g_3 + 2g_4 + 3g_5 + ... + (n - 2)g_n = n - 2,$$

siendo g_j el número de regiones de j lados que son exteriores al circuito. Finalmente, restando una ecuación de la otra se logra el objetivo, a saber, la fórmula de Grinberg:

$$(f_3 - g_3) + 2(f_4 - g_4) + 3(f_5 - g_5) + ... + (n - 2)(f_n - g_n) = 0.$$

"Elegante, Holmes, y sutil, no cabe duda. Pero sigo sin ver en qué sea pertinente para demostrar la culpabilidad de Oízo. No tenemos ni idea de cuáles puedan ser los valores de f_j y g_j. Y peor todavía, de no existir un circuito hamiltoniano, tampoco tales valores."

"Tengo la esperanza de que al suponer que existe un circuito hamiltoniano lleguemos a una contradicción lógica. Mire, Watson, si examina la malla correspondiente a la Alquería Siniestra comprobará que todas las regiones tienen 5, 7 o 9 lados. Si la malla admitiese un circuito hamiltoniano, por la fórmula de Grinberg

$$3(f_5 - g_5) + 6(f_8 - g_8) + 7(f_9 - g_9) = 0.$$

"Ahora bien, solamente existe una región de 9 lados —el territorio exterior a la red—, por lo que $f_9 - g_9$ tiene que ser 1 o −1. Sí, me parece que hemos cazado al pícaro éste. Por ahora, la lógica nos obliga a concluir que $3(f_5 - g_5) + 6(f_8 - g_8) = 7$. Pero es imposible hallar soluciones de tal ecuación, puesto que f_5, g_5, f_8 y g_8 son enteros. El primer miembro sólo produce múltiplos de 3, y el segundo sólo puede ser igual a +7 o a −7."

"¡Por consiguiente, no existe ningún circuito hamiltoniano! ¡Oízo miente! ¡Holmes, estoy mudo de admiración!"

El detective sonrió, halagado. "Muchas gracias, Watson. Oízo tuvo que haber visitado dos veces al menos una de las torres. La única razón de que mintiera es que fue la torre de la Srta. Nabiza la que visitaba. De hecho, existe cuando menos una ruta que visita sólo una vez todas y cada una de las torres, excepto la de la Srta. Nabiza, claro está. Mañana enfrentaremos a Oízo con las pruebas de su mendacidad."

"Impresionante, Holmes; verdaderamente brillante. Pero, ¿qué le hizo sospechar de él?"

"Envié discretamente un telegrama a Scotland Yard para que examinasen las fichas de los sospechosos y averigüé que el nombre completo del mayordomo es Enrique Luis Oízo."

Mi desconcierto creció aún más. "¿Y de qué le sirve eso, Holmes?"

"¿Qué otra conclusión cabe? Fíjese en las iniciales: ¡E. L. Oízo!"

Libros

Juan José Acero, Josep Pla i Carrera y Luis Alonso

Gramática del español

Entre lingüística y filosofía

DETRÁS DE LA PALABRA. ESTUDIOS DE GRAMÁTICA DEL ESPAÑOL, por Violeta Demonte. Alianza Editorial; Madrid, 1991.

La autora, una de las personas que mejor conocen y más competentemente practican la teoría gramatical chomskiana en el ámbito de la lingüística iberoamericana, reúne en este volumen ocho ensayos suyos escritos entre 1982 y 1991. Los siete primeros contienen otros tantos análisis y propuestas cuyo marco teórico es la Teoría del Régimen y el Ligamiento (GB: *The Government and Binding Theory*, en alusión a dos de sus componentes).

El octavo contiene una adhesión expresa a la Convención de la X con barras y acaba integrando con el resto un volumen sobre diversos aspectos de la gramática del español que está presidido por unos principios teóricos y metodológicos (¡y filosóficos!) muy definidos. Esos últimos son los que tienen su presentación paradigmática en la obra de Chomsky *Knowledge of Language*, de la que existe traducción española. Los primeros, si bien no se los expone de una forma sistemática a lo largo del volumen, son traídos a colación y frecuentemente explicados cuando se los necesita.

Con respecto a los principios teóricos y metodológicos globales, la idea que preside la obra es que una teoría gramatical es una respuesta a lo que Chomsky ha llamado el *problema de Platón*: el problema de cómo es posible que el conocimiento que tenemos de nuestra lengua materna sea tan creativo, tan independiente del estímulo y tan apropiado a las situaciones de uso como de hecho es cuando ese conocimiento se ha obtenido por medio de una experiencia fragmentaria de datos lingüísticos que son a menudo poco fiables.

La solución de Chomsky estriba en admitir la existencia de una facultad de lenguaje como parte de la herencia biológica de la especie humana y en hacer de esa facultad el objeto de la teoría gramatical.

La GB es, entonces, una propuesta sobre la naturaleza de esa facultad; una propuesta de acuerdo con la cual dicha facultad —un sistema de mecanismos cerebrales descritos a un cierto nivel de abstracción— consta de un conjunto de principios más un conjunto de propiedades parametrizadas. Si bien cada lengua consiste en una asignación de un valor a cada parámetro constreñida por el conjunto de principios comunes, éste y el sistema mismo de parámetros constituyen la Gramática Universal que se halla representada en la mente de cada ser humano.

Tres son los aspectos de la gramática del español sobre la que versan los ensayos del volumen: las propiedades léxicas de los verbos y su incidencia en la sintaxis de la oración, la predicación secundaria y dos aspectos de los sintagmas nominales, uno que trata del uso de artículos con valor posesivo y el otro sobre la posición del adjetivo en español. Vista la obra desde la perspectiva citada, los ensayos más destacables son los que llevan los siguientes títulos "Sobre agentes, experimentantes y objetos afectados. El dilema del lexicista", "Observaciones sobre la predicación secundaria: Mando-c, extracción y reanálisis", "El 'artículo en lugar del posesivo' y el control de los sintagmas nominales" y "El falso problema de la posición del adjetivo. Dos análisis semánticos". De éstos, el primero es seguramente el que mayor significación teórica puede tener. La hipótesis que en él se explora —añadir a la estructura de papeles temáticos una subestructura de eventos— permite aligerar el sistema de propiedades sintagmáticas de la gramática al ampliar el sistema de papeles temáticos del léxico del español.

Con ello se operaría una notable redistribución en el papel explicativo respectivo de la gramática y el léxico. Los otros tres tienen también repercusiones en la naturaleza de la predicación, cuantificación y anáfora pronominal y la modificación adjetiva, resultando sumamente útil apreciar la forma en que Violeta Demonte extiende la GB para abordar estas cuestiones.

La principal lección que debe extraerse de la lectura de estos ensayos es que la semántica que practican los lingüistas chomskianos y la semántica de lógicos y filósofos son empresas que atienden a cuestiones dispares. Para estos últimos los problemas semánticos se inician justo donde los primeros finalizan su trabajo. Así, la lectura de los análisis de la predicación secundaria que efectúa Demonte demuestra que los problemas que se plantean y los objetivos que interesan a los practicantes de la GB distan mucho de los que priman en una semántica de condiciones de verdad o de mundos posibles. Otro ejemplo. La autora habla del significado funcional de los elementos léxicos, refiriéndose a la estructura predicado-argumentos de los elementos léxicos. Para un lógico, esa estructura merecería el calificativo de "semántica" tan sólo en la medida en que constituiría un elemento preliminar al análisis semántico propiamente dicho. Esto mismo, sin embargo, muestra que las respectivas investigaciones serán a menudo complementarias. (J. J. A.)

Matemáticas de la Revolución

Dorado nacimiento

CONVOLUTIONS IN FRENCH MATHEMATICS, 1800-1840, por Ivor Grattan-Guinness. Tres volúmenes. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1990.

En la historia de las matemáticas hay dos hitos importantes que se sintetizan en dos obras concretas: *Los Elementos* de Euclides y *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural* de Isaac Newton. Y podemos afirmar que dichas obras constituyen la síntesis de dos procesos trascendentes en la historia del pensamiento humano occidental. La primera es la síntesis del pensamiento geométrico griego que, habiéndose iniciado en el siglo VI a. C. con Tales y Pitágoras,

hallará su culminación en el siglo III a. C. con Euricles, Apolonio y Arquímedes. Las aportaciones de Pappo y Proclo nos han permitido ciertas reconstrucciones importantes que, en manos de Thomas Heath, D. H. Fowler, Arpád Szabó y otros, se convierten en reconstrucciones históricas relevantes de las matemáticas griegas.

Los *Principia*, en cambio, constituyen la síntesis de un período breve pero muy activo del pensamiento del hombre occidental que se inicia con el descubrimiento de las obras de los grandes genios de la Grecia clásica ya citados y de Ptolomeo, enriquecidas por las aportaciones científicas y filosóficas del Islam.

Esta confluencia de saberes lleva a preguntarse por algo que, en la Grecia clásica, había quedado relegado: el *movimiento*, sus *leyes*, sus *principios*, sus *dificultades*, sus *posibilidades*, sus *consecuencias*, etc. Con las aportaciones e ideas de Nicholas Copernicus, Johannes Kepler, Galileo Galilei, René Descartes, Pierre de Fermat, Christian Huygens, por citar algunos de los hombres significativos, parece que Occidente ha hallado las leyes fundamentales del movimiento. Sin embargo, hace falta disponer de unos *nuevos elementos*, que permitan una matematización definitiva.

Esta síntesis se podrá alcanzar gracias a dos aportaciones notables del siglo XVII: la *geometría analítica* y el *cálculo diferencial* o de las *fluxiones* y su inverso, el *cálculo integral*.

La obra de Newton, broche de oro de un proceso empírico-filosóficomatemático anterior, constituye, a la vez, el punto a partir del cual empieza a remontarse el pensamiento matemático, físico y filosófico occidental. Los relevos los tomarán grandes atletas de la ciencia —el clan de los Bernoulli, Leonhard Euler, Alexis-Claude Clairaut, Jean de Rond D'Alembert, Joseph Lagrange, Gaspard Monge, Pierre Simon Laplace, Adrien-Marie Legendre, etc.— y con ello se iniciará una nueva carrera que hallará su síntesis con los matemáticos de la Revolución Francesa. A partir de ahí empezará un nuevo tramo de esta carrera de relevos en la que habrán de tomar parte Carl Friedrich Gauss, sir William Rowan Hamilton, Johann Peter Gustav Leujene-Dirichlet, Karl Theodor Wilhelm Weierstrass, Ernst Eduard Kummer, Georg Friedrich Bernhard Riemann, Julius Wilhelm Richard Dedekind, Georg Ferdinard Ludwig Phillip Cantor, etc.

En este período hacen aparición las ecuaciones diferenciales ordinarias y en derivadas parciales, el cálculo integral con las funciones beta y gamma, las integrales eulerianas y las elípticas, el cálculo de variaciones, la necesidad de recurrir al mundo de los números complejos, los balbuceos de la topología y de la geometría diferencial. Se trata de un proceso ligado a las necesidades de la física y, con ellas, al análisis matemático, a sus posibilidades y sus limitaciones que obligan a profundizar en los números reales y complejos, además de formalizar el concepto de infinitamente pequeño o infinitésimo.



Retrato de Gaspard Monge, realizado en 1803 por su discípulo Atthalin en su cuaderno de análisis.

Ivor Grattan-Guinness, autor de *The development of the foundations of mathematical analysis from Euler to Riemann*, y editor de una presentación histórica importante del análisis matemático desde el siglo XVII hasta finales del siglo XIX, *From the Calculus to Set Theory, 1630-1910. An Introductory History*, nos ofrece ahora *Convolutions in French Mathematics, 1800-1840*, en tres volúmenes. Los temas matemáticos más importantes, tratados en este período, cubren la totalidad del ámbito de las matemáticas y van desde el estudio de las ecuaciones con el teorema fundamental del álgebra y la necesidad de hallar métodos de cálculo aproximado de raíces, hasta el problema consistente en fundamentar, matemática y epistemológicamente, el concepto de infinitésimo, pasando por cuestiones de convergencia y divergencia en las series, el cálculo diferencial e integral, sin olvidar el análisis, clasificación y resolución de las ecuaciones diferenciales, el estudio del método de las diferencias finitas, el cálculo de variaciones que, ligado a los problemas isoperimétricos y al principio de la mínima acción, había de ejercer un papel destacado en el desarrollo de la física

de la época. Además, la aparición de funciones más complicadas como las elípticas, las de Bessel, los polinomios de Legendre, etc., y de las integrales y series de Fourier, así como el papel de las funciones de variable compleja y las integrales complejas y el estudio de la teoría del potencial desde las matemáticas vienen a complicar el panorama de las del período 1800-1840.

Todos estos problemas y cuestiones matemáticas se hallaban ligados con los problemas y cuestiones de la física que se empezaba ya a clasificar en bloques temáticos: el cielo y su estabilidad con las cuestiones relativas a la geodesia y a la geometría diferencial; la mecánica, tanto en su idealización puntual cuanto en su generalidad más compleja del sólido y los fluidos, con las cuestiones de la capilaridad; la hidrodinámica, la acústica y el estudio del sonido y de la elasticidad. La óptica, que conllevaría nuevos conceptos como la difracción, la polarización, la dispersión, etc. Los intentos de clarificar la naturaleza de la luz y sus leyes. El calor, la electricidad y el magnetismo.

Y Grattan-Guinness nos ofrece su grano de arena en el estudio de este entramado de cuestiones matemáticas y físicas con esta obra que constituye un seguimiento de las aportaciones individuales de los grandes artífices de la época: André-Marie Ampère, Jean-Baptiste Biot, Lazare Nicolas Marguerite Carnot, Augustin-Louis Cauchy, Charles Dupin, Jean Baptiste Joseph Fourier, Sylvestre-François Lacroix, Joseph Louis Lagrange, Pierre Simon Laplace, Adrien-Marie Legendre, Gaspard Monge, Siméon Denis Poisson, Jean Victor Poncelet, etc.

La obra está expuesta con rigor. Síntesis indispensable para el estudio del desarrollo histórico de las matemáticas de este período, es fuente de inspiración para ulteriores estudios, matizaciones y profundizaciones. (El tercer volumen, con más de 250 páginas, contiene una recopilación de textos manuscritos, nos ofrece datos biográficos de los principales intérpretes y aporta una amplia bibliografía e índices temáticos muy completos.)

Su importancia no radica quizá tanto en lo que dice —indiquemos, de pasada, que no cubre ni con mucho la totalidad de las matemáticas existentes, dejando en la cuneta las cuestiones más puramente algebraicas, los problemas y métodos de la aritmética que empezaba a tomar forma como disciplina matemática organizada y potente, y mundo de la probabilidad que en tan poco tiempo habría de alcanzar un enorme desarrollo teórico y práctico—, sino en la forma de presentarlo, en la capacidad que tiene el autor para sumergirnos en el ambiente de los problemas planteados, de las técnicas usadas en su resolución, en las limitaciones y evolución de dichas técnicas y métodos. Ambiente que, en historia de la ciencia, siempre es difícil recrear y que sólo los grandes maestros consiguen captar y transmitir. (J. P.)

Homo faber

Técnica para la ciencia

Storia delle scienze. Gli strumenti. Gerard L'E. Turner *et alii.* Giulio Einaudi Editore; Turín, 1991.

The art of medieval technology. Images of Noah the shipbuilder, por Richard W. Unger. Rutgers University Press; New Brunswick, 1991.

The pulse of time. Galileo Galilei, the determination of longitude, and the pendulum clock, por Silvio A. Bedini. Leo S. Olschki; Florencia, 1991.

Scientific instruments and experimental philosophy 1550-1850, por Gerard L'E. Turner. Variorum Reprints; Hampshire, 1990.

Si una de las cualidades definidoras del hombre es su capacidad de crear instrumentos (*Homo faber*, diría Benjamin Franklin), la historia de cómo los ha ido creando constituye, sin duda, una de las aproximaciones más acertadas a su propio devenir. Cuando esos medios alcanzan cierto refinamiento, hasta el punto de hacer avanzar la ciencia, el estudio de los mismos se convierte en una apasionante aventura. Sólo falta el ingenio del paciente cacharrero que sepa reconstruirlos y repararlos. Y ése, en la comunidad de los especialistas, tiene un nombre: Gerard L'E. Turner. Tomándole prestadas las palabras que escribe a propósito de un libro de David Lindberg, de esta misma colección, diremos de *Scientific Instruments and Experimental Philosophy 1550-1850*, "hemos de mostrarnos agradecidos por esta gavilla de artículos, ya que aclara la importancia de los instrumentos para nuestra comprensión de la ciencia moderna y pone de manifiesto la dificultad de desentrañar la historia intelectual de esos tiempos".

Se ofrecen, en este volumen, compilados quince artículos, publicados en distintas fechas y lugares, que sintetizan una labor de veinticinco años de trabajo en el Museo de Historia de la Ciencia de la Universidad de Oxford. Los agrupa en tres apartados: de interés general, comercio de instrumentos científicos y gabinetes de filosofía experimental.

De interés general es orientar al lector primerizo por la silva de escritos, no excesivamente frondosa, de la bibliografía de iniciación. Procura Turner escoger los que describen el mecanismo del aparato relacionándolo con la teoría científica subyacente o a la que pretende auxiliar, mientras introduce los rasgos distintivos del sentido y la evolución de la tecnología.

Que el paso de la ciencia lo marca el paso de la técnica y éste el de la mensuración lo muestra el ejemplo del reloj. Tras el reloj de agua, de sol o de arena, que permiten a lo más cierto refinamiento, el reloj mecánico se nos revela como un pautador constante del tránsito del tiempo, cuya precisión máxima llegó, cinco siglos después de su invención, a finales del XIX. Incrementó un millón de veces la exactitud del solar. El advenimiento del reloj de cuarzo, a mediados de nuestro siglo, decuplicó la precisión del más fino de los mecánicos. Lo más importante, puso en obra el efecto piezoeléctrico, en virtud del cual un cristal de cuarzo produce una diferencia de carga eléctrica a través de las caras cuando lo sometemos a una presión; recíprocamente, el curso de una carga por las caras provoca la resonancia del cristal a una frecuencia precisa. La posterior llegada del reloj del átomo de cesio extremó, en un factor de cien, la exactitud del anterior y permitió trabajar con seguridad en el campo de la normalización astronómica del tiempo.

A Turner le apasiona la reconstrucción del microscopio. Ello le ha obligado a investigar el origen de los instrumentos ópticos, tarea que le llevó a ponderar las posibilidades técnicas reales de los tratados medievales de Robert Grosseteste, Roger Bacon, Witelo, John Pecham y Alhacén. No lo hace directamente, sino a través de las exposiciones de Lindberg y Crombie, de cuyos resultados discrepa a veces en una exposición de signo complementario, aquéllos atentos a las bases geométricas de los perspectivistas, éste atendiendo a

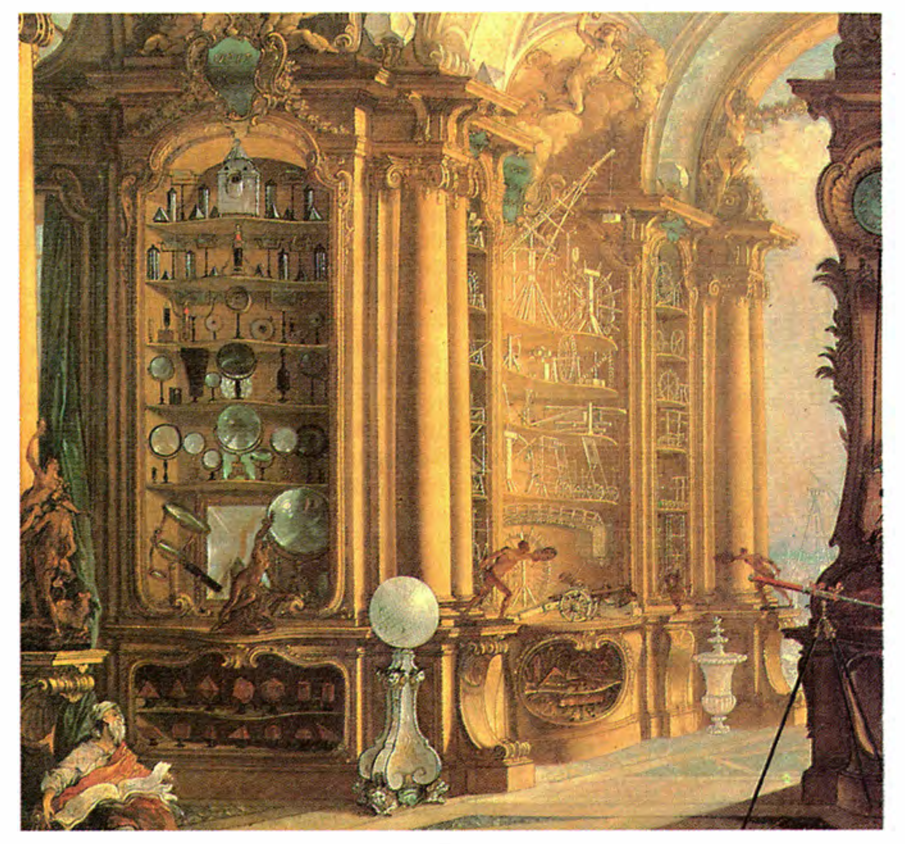
la física de la reflexión y refracción en distintos medios e ingenios (espejos ustorios incluidos). Casi sin solución de continuidad repite el mismo planteamiento a propósito del nacimiento del telescopio y su conocimiento por Galileo.

El grueso de la segunda parte se centra en el comercio inglés de microscopios, telescopios, teodolitos, cuadrantes, alidadas, etcétera, después del esplendor que conocieron las islas con la llegada de artesanos holandeses y la sustitución de la aritmética romana por la arábiga, ambos sucesos en el siglo XVI. Con la fotografía del instrumento, el taller o maestro que lo realizó, aporta las dimensiones, forma de montarlo, pieza por pieza, alcance, dibujo de las secciones importantes, e incluso lo que se pagó por ellos en subasta.

Es objetiva la breve alusión a la España de Felipe II, quien "se opuso a la Reforma pero no a la ciencia, y se rodeó de matemáticos, ingenieros y físicos". La bibliografía que maneja puede el lector hispano completarla con los trabajos de L. A. García-Diego y la investigación sistemática del grupo de Valladolid (García Tapia, Esteban Piñero, Vicente Maroto y otros). Hubo, en efecto, una poderosa escuela en torno al monarca, desconocida hasta hoy mismo para sus propios compatriotas.

Un enfoque completamente distinto es el seguido por Richard W. Unger en *The Art of Medieval Technology*, libro cuyo contenido responde mejor a su subtítulo *Images of Noah the Shipbuilder*. Se trata, en efecto, de un recorrido por biblias, manuscritos, mosaicos, vidrieras y capiteles donde aparece la figura del patriarca Noé dirigiendo la construcción del arca, y a través de esa estampa captar las artes de la carpintería de ribera del norte y del sur de Europa durante los siglos XII-XIV, principalmente.

Unger necesita la técnica para explicar el comercio y la economía, su último interés. Pero casi siempre la emplea a modo de pretexto ineludible. No espere, pues, el lector encontrar aquí un análisis pormenorizado de la evolución de los vasos en el Atlántico y el Mediterráneo, ni siquiera en el capítulo directamente concernido, el cuarto ("Técnica de construcción naval europea"), donde se limita a mostrar la diferencia entre los barcos del norte y el sur del continente en razón del distinto ensamblaje de las tablazones del casco y el patrón general de armazón, si rellenando el esqueleto o cuaderna a



"El gabinete de Bounier de la Mosson", 1734, de Jacques Lajoue. Se distinguen perfectamente los estantes con instrumentos ópticos y mecánicos.

cuaderna, amén de una mirada somera hacia la coca y la vela latina. Tampoco debe exigírsele más en esta monografía.

Entre sus páginas navegará más cómodo el humanista que el científico estricto, quien no entenderá la razón de tanta alusión a otros autores para interpretar las relaciones entre técnica y arte, o entre técnica y comercio. Pero también éste sacará provecho del riguroso repaso al creciente aprecio y respeto a la naturaleza y a las artes (mecánicas) que se ocupan de la transformación de aquélla, cuyo fruto primero será la creación de gremios y, a medio plazo, la emancipación de las ciudades frente al poder feudal. Asimismo, el lector humanista irá más allá de la mera lectura simbólica o histórica de la escena para descubrir en ella el mundo en que vivió el artista, quien carente de toda perspectiva temporal conjugaba motivos del Génesis (el arca) con su vida diaria (el vaso representado y la distribución del trabajo con el maestro al frente).

Entre las fuentes de que se ha servido, Unger cita varias españolas: las Biblias de Pamplona, el fresco de Sigena y un capitel del claustro catedralicio de Gerona. En el primer caso, el barco tiene una factura más mediterránea que septentrional, en el segundo la influencia es bizantina y en el tercero la escena recuerda ciertos manuscritos ingleses, lo que sugiere una interrelación fluida entre puntos muy alejados en la geografía.

Un capítulo clásico en la historia de la técnica es el relacionado con la determinación de la longitud en alta mar y la invención del reloj de péndulo, que permitía por vez primera medir el tiempo en segmentos precisos. Los ríos de tinta vertidos no han retraído a Silvio A. Bedini, quien rescata y reinterpreta textos galileanos para hacernos más verosímil la paternidad del pisano en la creación del nuevo cronómetro. *The pulse of time* no es, pues, uno más en la abundante bibliografía, ya secular, tejida de precursores y convergencias. Sigue día a día el quehacer de Galileo en un tema recurrente a lo largo de toda su vida.

Para Bedini, la invención del reloj mecánico regulado por péndulo debióse a Galileo en 1641-1642, se aplicó con éxito en Florencia en el intervalo de los diez años siguientes y cristalizó también siguiendo otra idea de Christian Huygens en 1656-1657.

Galileo no fue sólo una mente es-

peculativa poderosa. Pocos como él han conjugado con igual soltura capacidad deductiva y habilidad técnica. Es de dominio público la perfección de sus telescopios. Quizá no sea tan conocida la ingente cantidad de ingenios menos espectaculares que salieron de sus manos, muchos de ellos relacionados con el péndulo, como el pulsilógium para determinar los latidos en los pacientes enfebrecidos. Bedini recuerda el episodio protagonizado por su hija mayor, sor María Celeste, quien tras muchos intentos de reparar el reloj del convento, incluida la intervención de su hermano Vincenzio, experto artesano a su vez, se decide a enviárselo al padre. Se lo devolvió arreglado. “Ahora —le confirma su hija— funciona maravillosamente.”

El conocer la longitud del lugar se había hecho cuestión de estado para el éxito de la navegación en un tiempo, finales del XVI, en que el comercio marítimo constituía el eje de la economía de España y Portugal, amenazada por las flotas emergentes de holandeses, franceses e ingleses. Felipe III propuso un premio sustancioso (una renta anual de 6000 ducados más otras sinecuras) para quien lograra idear el método y confeccionar el instrumento medidor. Entre los interesados de segunda hora figuró Galileo, cuando ya había descubierto los satélites de Júpiter y establecido aproximadamente sus revoluciones. Bedini explica las razones del fracaso de los esfuerzos de Argensola y de Zúñiga en implicar a Galileo y de la voluntad de éste por venir a España.

Descartada la vía española, Galileo mira a Holanda. Para entonces, segunda mitad de los años treinta del XVII, está probando ya un “numeratore del tempo”, que utilizaba la oscilación del péndulo. Ensaya péndulos de segundos. Buscaba, en definitiva, un instrumento que funcionara en un barco, hasta que, por fin, con su hijo esboza el regulador de péndulo. La enfermedad y la muerte le impidieron verlo realizado. La segunda parte de la historia está consagrada a las medidas tomadas en Toscana para normalizar el tiempo (reloj del Palazzo Vecchio y tablas horarias) y la polémica sobre la primacía entre Huygens y Galileo por la invención de un instrumento que renovó la medición astronómica y la navegación.

Han demostrado siempre los italianos buena mano en la confección de enciclopedias. Ya en el campo de la historia de la ciencia, supuso un buen esfuerzo de síntesis la dirigida en los años sesenta por Nicola Abbagnano. *Storia delle scienze* abre sus páginas a especialistas de todo el mundo y recoge, por supuesto, la labor historiográfica de los últimos treinta años, los más fecundos en el desarrollo de la disciplina.

Podrán ponerse objeciones en un afán de tan amplio espectro. Por ejemplo, en este primer volumen, sobre *Gli strumenti*, faltan los ideados para el desarrollo de la investigación biológica; en el dominio de la ecología marina, esa omisión de bulto podríamos cifrarla en la ausencia del disco de Secchi. Algunos capítulos están descompensados, el más flojo el dedicado a la medicina y cirugía. Pero no es hacia lo negativo hacia lo que se decanta el fiel de la balanza de esta magnífica obra.

En primer lugar, constituye todo un acierto haber pensado consagrar un volumen a la herramienta a través de la cual el científico experimenta u observa el cumplimiento de una hipótesis. Segundo acierto, la disposición del volumen: astronomía y su extensión en los planetarios y mediciones del tiempo, pesos y medidas, instrumentos de nivelación, de navegación, de cálculo, instrumentos propios de la química, la mecánica, la hidrostática y la pneumática, meteorología, electricidad y magnetismo, los relativos al calor, el sonido, la luz y ópticos, instrumentos quirúrgicos y médicos, los decisivos para el avance de la física moderna, y evolución de la industria de los instrumentos científicos en América (de Silvio A. Bedini), Francia e Inglaterra. El tercer acierto se refiere a la parte iconográfica, con fotografías espléndidas y epígrafes explicativos de sus prestaciones; lástima que se halla olvidado la ilustración esquemática del corazón del ingenio, que permitiría intentar su reproducción.

Se ha encargado Turner de la dirección del volumen, quien introduce, además, un resumen orientador de la historia del instrumento y redacta, asimismo, el capítulo dedicado a la astronomía. Si a él añadimos el escrito por John R. Millbum sobre los planetarios, el que describe los relojes, el de David A. King sobre la instrumentación astronómica en el mundo islámico medieval y parte del capítulo sobre óptica, que telescopios, astrolabios, cuadrantes y demás, las ciencias de los astros se llevan un tercio largo de la obra. Puestos a singularizar, quizás el apartado de la nivelación (teodolitos, trianguladores, odómetros, trigonómetros) merezca resaltarse. (L. A.)

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en *Investigación y Ciencia* a partir de enero de 1992. Se incorpora, asimismo, la relación alfabética de las secciones *Perfiles, Juegos matemáticos, Juegos de ordenador* y *Taller y laboratorio.*

AUTORES

TITULOS

PERFILES

JUEGOS MATEMATICOS Y DE ORDENADOR

por Ian Stewart

TALLER Y LABORATORIO